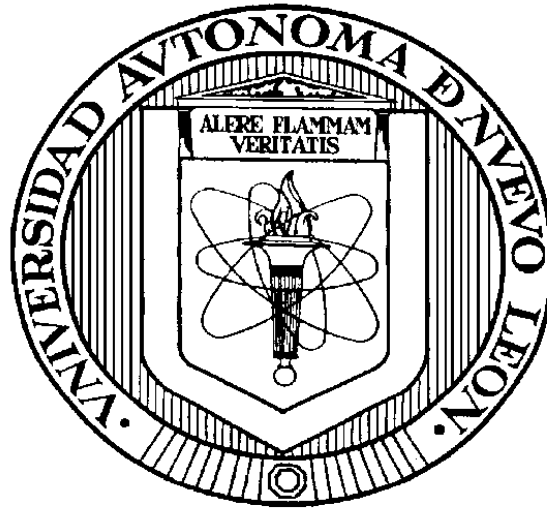


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ESTRUCTURAS

**POR
JOSÉ GERARDO GARCÍA MARTÍNEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

NOVIEMBRE, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TESIS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ESTRUCTURAS

POR
JOSÉ GERARDO GARCÍA MARTÍNEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL

NOVIEMBRE, 2019

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ESTRUCTURAS

Aprobación de la Tesis

Dr. Fabián Rene Ruvalcaba Ayala
Director de la Tesis

Dr. Jorge Humberto Chávez Gómez
Codirector de la Tesis

Dr. Ricardo González Alcorta
Jurado de Tesis

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente.-

Estimado Dr. Juárez

Por este medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título: **“Comportamiento térmico de estructuras”**, que presenta el **ING. JOSÉ GERARDO GARCÍA MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 9 de diciembre de 2019

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

“ALERE FLAMMAN VERITATIS”

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., a 5 de noviembre de 2019

DR. FABIAN RENE RUVALCABA AYALA

Director de Tesis



Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tel: 1442 4413 Fax: 1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título "**Comportamiento térmico de estructuras**", que presenta el **ING. JOSÉ GERARDO GARCÍA MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 9 de diciembre de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 11 de noviembre de 2019

DR. JORGE HUMBERTO CHÁVEZ GÓMEZ

Evaluador



EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y
TRASCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

CODIGO: FOR-SEP-01: Revisión 03

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels. 81 1442 4400 ext. 4448 | 81 8329 4000 ext. 7316 y 7234
<http://fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Comportamiento térmico de estructuras"**, que presenta el **ING. JOSÉ GERARDO GARCÍA MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 9 de diciembre de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 5 de noviembre de 2019

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
Evaluador



CODIGO: FOR-SEP-01: Revisión 03

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels. 81 1442 4400 ext. 4448 | 81 8329 4000 ext. 7316 y 7234
<http://fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque con Él todo, sin Él nada, por darme la sabiduría, la paciencia y la fuerza para terminar este trabajo, por siempre poner en mi camino todo lo necesario para continuar con mis estudios y principalmente por darme vida para cumplir este sueño.

Agradezco a mis padres Raquel Martínez Enríquez y Luis Gerardo García Martínez, porque en todo momento fueron mi soporte, mi impulso y mi alegría para luchar por mis objetivos, a mi hermana Ana Raquel por ser mi amiga y ejemplo para mí, a Valeria Cisneros quien me acompañó y apoyó durante estos últimos años de mi vida, cada día motivándome y levantándome en cada tropiezo para seguir adelante, a ustedes mi familia, los llevo en mi mente y corazón cada día.

Agradezco también a la familia García Ortiz, quienes me brindaron un hogar y me hicieron sentir en casa, a toda mi familia, quienes con sus palabras, oraciones y acciones fueron partícipes de este gran logro.

Gracias al M.H.V.C. por ser parte aguas en mi vida y enseñarme gran parte de lo que persigo y de lo que soy, ¡Siempre Horizonte!.

Gracias equipo Tigres de Tenis, quienes hicieron que mi estancia en la universidad fuera un sueño, siendo su capitán me ayudaron a conquistar una meta mas en mi vida, los echaré de menos.

Agradezco a mis amigos y compañeros de Maestría, gracias por su apoyo, por su empatía, sus ganas de querer superarse, por todos los buenos momentos que pasamos juntos, no tengo duda del éxito que alcanzarán.

A mis profesores, especialmente al Dr. Fabián Ruvalcaba, director de este

trabajo, gracias por su ardua labor para que pudiese concluir nuestro proyecto, gracias por sus consejos y su intensa labor siempre profesional, mi mas grande admiración para usted, Dr. Jorge Chávez, gracias por su ayuda en mi crecimiento durante esta etapa de mi vida, me motivó a seguir preparándome y a conocer el valor del conocimiento, Dr. Ricardo Alcorta gracias por su entusiasmo, su habilidad para convertir lo complejo en sencillo pero sobretodo por su calidad humana, Dr. Tadeo Terán y Dr. Roberto Pérez, gracias por ser participes de mi formación académica, al Departamento de Estructuras y M.C. Diego Cavazos por su gran apoyo.

Gracias a la Facultad de Ingeniería Civil, al Instituto de Ingeniería y especialmente a los Subdirectores Dr. Cesar Juárez y Dr. Gerardo Fajardo, gracias al personal de Posgrado y Biblioteca, siempre atentos conmigo, agradezco su apoyo y su grano de arena para que pudiese desarrollar mis estudios,

A ti lector, gracias por prestarme de tu tiempo para leer este trabajo, utilízalo y obtén el mejor provecho de él.

*“Si alguno quiere venir en pos de mi, niéguese
a si mismo, tome su cruz y sígame*

Mt. 16, 24

RESUMEN

José Gerardo García Martínez

Fecha de Graduación: 09/12/2019

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE ESTRUCTURAS

Número de páginas: XXX

Candidato para el grado de Maestro en
Ciencias con Orientación en Ingeniería
Estructural

Área de Estudios: Ingeniería Estructural

Propósito y Método del Estudio:

Se presenta una investigación realizada sobre la capacidad térmica de una estructura de mampostería situada en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, expuesta a las condiciones climáticas extremas que se viven en la de Monterrey.

Mediante el uso de sistemas eléctricos de medición (termopares), se obtuvieron datos de las temperaturas que interactúan con la estructura en estudio, con el objetivo de evaluar la transferencia calor durante un periodo de veinticuatro horas continuas. Los datos obtenidos se usaron para alimentar, al software conocido como Abaqus CAE, usado para desarrollar un modelo computacional y mediante la técnica de los elementos finitos se realizó el análisis térmico, posteriormente se simularon otros modelos de la misma estructura pero con diferentes combinaciones de propiedades de los materiales como bloque tradicional de concreto de tres celdas (BCA), bloque de concreto ligero (BCL) y bloques de arcilla extruida (BAE).

Con los resultados obtenidos de la investigación, se pretende indicar cual modelo y su correspondiente material puede proveer un mejor comportamiento en la estructura y como consecuencia un decremento en el uso excesivo de sistemas de enfriamiento, ocasionando un alto consumo de energía eléctrica y favoreciendo el cambio climático debido a las emisiones descontroladas de CO₂.

Contribuciones y Conclusiones:

Los resultados finales de esta investigación muestran una comparativa muy aproximada entre los valores de temperaturas medidas y los obtenidos a través de las simulaciones de los modelos desarrollados, además, la estructura elaborada con BAE presenta un mejor desempeño térmico en comparación a las otras piezas, sin embargo, no es posible alcanzar los valores de confort térmico establecidos en los códigos internacionales y normas locales

LISTA DE CONTENIDO

CAPÍTULO	PÁGINA
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Descripción del proyecto.....	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Hipótesis	4
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos.....	5
1.6 Alcances y limitaciones de proyecto.....	6
1.7 Conclusiones	7
 Capítulo 2 Estado del conocimiento	 8
2.1 Aspectos generales	8
2.1.1 Temperaturas en el país.....	8
2.1.1.1 Ciudad de Monterrey	9
2.1.1.2 Estado de Nuevo León	12
2.1.1.3 Zona norte	13
2.1.1.4 Zona centro.....	14
2.1.1.5 Zona sur.....	15
2.1.2 Registro histórico de temperaturas en Nuevo León	16
2.1.3 Panorama energético nacional y global.....	19
2.1.4 Confort térmico	21
2.2 Leyes de la termodinámica.....	24
2.3 Transferencia de calor	26
2.3.1 Mecanismos de transferencia de calor	27
2.3.2 Conducción.....	28
2.3.3 Convección	31
2.3.4 Radiación.....	34
2.4 Propiedades térmicas de los materiales.....	36

2.4.1 Conductividad térmica	37
2.4.2 Calor específico	38
2.4.3 Emisividad	39
2.4.4 Expansión y contracción térmica	40
2.4.5 Calor latente	40
2.4.6 Propiedades adicionales.....	41
2.4.6.1 Densidad.....	41
2.4.6.2 Porosidad.....	42
2.4.6.3 Contenido de humedad	42
2.5 Introducción al método de los elementos finitos.....	43
2.6 Descripción del método de los elementos finitos.....	45
2.6.1 Discretización del dominio	47
2.6.1.1 Tipos de elementos	48
2.6.1.2 Modelos de interpolación.....	50
2.6.1.3 Derivación de las ecuaciones del elemento	51
2.7 Ensamble de matrices de los elementos	53
2.8 Condiciones de frontera.....	54
2.9 Solución de ecuaciones para los grados de libertad	55
2.10 Estudios basados con modelos matemáticos.....	55
2.11 Estudios basados con modelos computacionales	58
2.12 Reglamentación y normativas del comportamiento térmico en estructuras.....	61
2.13 Conclusiones	66
Capítulo 3 Desarrollo del modelo.....	67
3.1 Introducción	67
3.2 Software computacional	68
3.3 Fases de transferencia de calor	68
3.4 Recopilación de datos de campo.....	71
3.4.1 Equipamiento utilizado.....	72
3.4.2 Estructura en estudio.....	74
3.4.3 Lectura de datos	76

3.4.4 Gráficas temperatura-tiempo de la estructura	79
3.4.4.1 Curvas de temperatura obtenidas a temperatura ambiente alta	80
3.4.4.2 Curvas de temperatura obtenidas a temperatura ambiente baja	80
3.5 Modelo térmico computacional	82
3.5.1 Geometría	83
3.5.2 Propiedades térmicas de los materiales	84
3.5.3 Ensamblado del modelo	86
3.5.4 Tipo de elementos y mallado	89
3.5.5 Modos de transferencia de calor	91
3.5.6 Tipo de análisis	93
3.6 Modelo alternos	93
3.6.1 Propiedades térmicas de los modelos alternos	94
Capítulo 4 Análisis de resultados	95
4.1 Resultados térmicos del modelo	95
4.1.1 Curvas de temperatura ambiental alta	97
4.1.2 Curvas de temperatura ambiental baja	98
4.1.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta	100
4.1.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental baja	104
4.2 Resultados térmicos de los modelos alternos	108
4.2.1 Modelo de bloques de arcilla extruida (BAE) Modelo 1	108
4.2.1.1 Curvas de temperatura ambiental alta	108
4.2.1.2 Curvas de temperatura ambiental baja	109
4.2.1.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta ..	110
4.2.1.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta ..	112
4.2.2 Modelo de bloques de concreto ligero (BCL) Modelo 2	113
4.2.2.1 Curvas de temperatura ambiental alta	113
4.2.2.2 Curvas de temperatura ambiental baja	114
4.2.2.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta ..	115
4.2.2.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta ..	117
4.3 Validación del modelo	118

4.3.1 Validación de resultados del modelo computacional vs datos de lectura de campo (temperatura ambiental alta).....	120
4.3.2 Validación de resultados del modelo computacional vs datos de lectura de campo (temperatura ambiental baja).....	123
4.3.3 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental alta).....	124
4.3.4 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental baja).....	125
4.3.5 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 1 (temperatura ambiental alta)	125
4.3.6 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 1 (temperatura ambiental baja)	126
4.3.7 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 2 (temperatura ambiental alta)	127
4.3.8 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 2 (temperatura ambiental baja)	128
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	130
Anexo A.....	139
Referencia bibliográfica	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas promedio anuales (Weather Spark, 2019).....	9
Figura 2. Temperatura promedio por hora anual	9
Figura 3. Niveles de comodidad de la humedad (Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, 1982).....	10
Figura 4. Datos cartográficos de la Carta de Climas de Nuevo León (INEGI, 2017)	12
Figura 5 a) Temperatura máxima promedio mensual (°C) julio 2018; b) Temperatura mínima promedio mensual (°C) enero 2018 (INEGI, 2018)	16
Figura 6 Diagrama de la Ley Cero de la termodinámica (Cengel, 2011).....	24
Figura 7. Dirección de transferencia de calor (García, 2019)	27
Figura 8. Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen en una pared plana grande (Cengel, 2011).....	28
Figura 9. Conducción de calor unidimensional a través de pared plana a) Muro simple, b) Muro compuesto (Barbosa <i>et al</i> , 2016)	30
Figura 10. Esquema de distribución de fluidos en convección a) Libre, b) Forzada (García, 2019)	31
Figura 11. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación por un material semitransparente (Wu, 2015).....	35
Figura 12. Diagrama de difusión de energía de radiación de un cuerpo negro a) Uniforme, b) No uniforme (Cengel, 2011).....	38
Figura 13. Proceso de la modelación matemática (Edwards, 2001).....	43
Figura 14. Elementos finitos unidimensionales tipo barra (Dessault Systemes, 2015).....	47
Figura 15. Elementos finitos bidimensionales a) cuadrilátero 4 nodos, b) cuadrilátero 9 nodos, c) cuadrilátero 12 nodos, d) triangular 3 nodos, e) triangular 6 nodos, f) triangular 10 nodos (Dessault Systemes, 2006)	48
Figura 16. Familias de elementos finitos en Abaqus CAE (Dessault Systemes, 2015).....	49
Figura 17. Ejemplos de condiciones de frontera en la transferencia de calor unidimensional (Chandrupatla, 1999)	53

Figura 18. Adquisidor de datos (Datalogger) N.I. PXIe-1065.....	71
Figura 19. Terminal N.I. PXIe-4353.....	71
Figura 20. Termopar tipo "J".....	71
Figura 21. Termómetro digital laser 790066M	71
Figura 22. Localización de la estructura prototipo de estudio	72
Figura 23. Estructura prototipo de estudio ubicada en el Campus del Instituto de Ingeniería Civil UANL.....	73
Figura 24. Aplicación de termopares en muros exteriores.....	74
Figura 25. Esquema de localización de los termopares en la estructura (vista en planta)	75
Figura 26. Diagrama de localización de termopares en la estructura (vista en elevación).....	75
Figura 27. Ubicación de termopares en muro y en planta de intersección de muros (metros).....	76
Figura 28. Perfil de temperaturas verano 2019.....	78
Figura 29. Perfil de temperaturas invierno 2019	79
Figura 30. Estructura en estudio a) juntas de mortero, b) columna de concreto, c) acabado de mortero/yeso, d) bloque hueco de concreto, e) losa de concreto, f) viga de concreto.....	82
Figura 31 Modelo ensamblado.....	84
Figura 32 Modelo ensamblado con acabados	85
Figura 33. Esquema de restricción tipo "Tie-Constraint" (dessault Systemes, 2015)	86
Figura 34. Condiciones de frontera en el modelo computacional	87
Figura 35. Tipo de elemento tridimensional utilizado a) DC3D4, b) DC3D10	88
Figura 36. a) Modelo computacional mallado con elementos DC3D10, b) acercamiento sobre superficie mallada de muro	89
Figura 37. Ubicación de nodos analizados en el modelo computacional.....	95
Figura 38. Relación temperatura-tiempo en la condición de temperatura ambiental alta	96

Figura 39. Relación temperatura-tiempo en la condición de temperatura ambiental baja	97
Figura 40. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (00:00 hrs) en °C	98
Figura 41. Distribución de la temperatura interior en la estructura (00:00 hrs) en °C	99
Figura 42. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (24:00 hrs) en °C	100
Figura 43. Distribución de la temperatura interior en la estructura (24:00 hrs) en °C	101
Figura 44. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (00:00 hrs) en °C	102
Figura 45. Distribución de la temperatura interior de la estructura (00:00 hrs) en °C	103
Figura 46. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (24:00 hrs) en °C	104
Figura 47. Distribución de la temperatura interior en la estructura (24:00 hrs) en °C	105
Figura 48. Curva de temperatura ambiental alta del Modelo 1	107
Figura 49. Curva de temperatura ambiental baja del Modelo 1	108
Figura 50. Distribución de la temperatura ambiental alta (00:00 hrs) ambas caras	109
Figura 51. Distribución de la temperatura ambiental alta (24:00 hrs) ambas caras	109
Figura 52. Distribución de la temperatura ambiental baja (00:00 hrs) ambas caras	110
Figura 53. Distribución de la temperatura ambiental baja (24:00 hrs) ambas caras	111
Figura 54. Curva de temperatura ambiental alta del Modelo 2	112
Figura 55. Curva de temperatura ambiental baja del Modelo 2	113

Figura 56. Distribución de la temperatura ambiental alta (00:00 hrs) ambas caras	114
Figura 57. Distribución de la temperatura ambiental alta (24:00 hrs) ambas caras	115
Figura 58. Distribución de la temperatura ambiental baja (00:00 hrs) ambas caras	116
Figura 59. Distribución de la temperatura ambiental baja (24:00 hrs) ambas caras	116
Figura 60. Curvas de calibración del mallado según el tipo de elemento finito (temperatura ambiental alta)	118
Figura 61. Curvas de calibración del mallado según el tipo de elemento finito (temperatura ambiental baja)	118
Figura 62 Curvas de temperatura del modelo computacional vs estructura real en temperatura ambiental alta	120
Figura 63 Curvas de temperatura del modelo computacional vs estructura real en temperatura ambiental baja	121
Figura 64 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental alta)	122
Figura 65 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental alta)	124
Figura 66. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 1 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental alta)	126
Figura 67. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 1 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental baja)	127
Figura 68. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 2 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental alta)	128
Figura 69. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 2 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental baja)	129
Figura 70. Distribución del calor en estructura de mampostería ante temperaturas altas	134

Figura 71. Distribución del calor en estructura de mampostería ante temperaturas bajas.....	135
Figura 72. Porcentaje de aportación de calor hacia el interior de la estructura ..	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura media anual por regiones y municipios de Nuevo León (INEGI, 2017)	11
Tabla 2. Principales características de las regiones climáticas de México (Vidal, 2015)	15
Tabla 3. Registro de temperaturas mínimas del periodo 1993-2009 (Ríos, 2011)	17
Tabla 4. Registro histórico de temperaturas anuales desde 1990-2018 (INEGI, 2018)	18
Tabla 5. Escala de sensación para confort térmico (Fanger, 1973)	21
Tabla 6. Parámetros de evaluación para índice de confort térmico (Fanger 2017)	21
Tabla 7. Propiedades termodinámicas de la materia	23
Tabla 8. Valores de expansión térmica de elementos de mampostería (Eurocode, 2005)	39
Tabla 9. Porcentajes de porosidad accesible en el concreto	41
Tabla 10. Normas Oficiales de eficiencia energética	61
Tabla 11. Normas internacionales aplicadas a ISO-6946 (UNE, 2015)	62
Tabla 12. Resumen de estándares establecidos según normas internacionales y locales para confort térmico (Bustillos, 2017)	64
Tabla 13. Rango de valores de las propiedades térmicas y físicas de los elementos (Tae, 2013; Al-Hazmy, 2006; Del Coz Díaz, 2007; Antar, 2009; Zhang, 2009; Illampas, 2017; Kanellopoulus, 2017; Sassine, 2017, Nguyen, 2009; Raefat, 2017; Asadi, 2018; Al-Sanea, 2013)	83
Tabla 14. Valores de las propiedades utilizadas en el modelo computacional	83
Tabla 15. Resumen de datos para Step (Heat transfer)	91
Tabla 16. Rango de valores para propiedades de los materiales alternos (ACI-122R, 2002; Gallegos, 2005; Remesar, 2017; Molar-Orozco, 2017; Nguyen, 2009; Raefat, 2017; Cusodio-García, 2005; Lira-Cortés, 2008; Sassine, 2017)	93
Tabla 17. Tipo de elemento finito vs tiempo de análisis	117
Tabla 18. Comparación de resultados teóricos de resistencia térmica para bloques (15cm)	123

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En principio, las estructuras tienen como función básica resistir adecuadamente en conjunto las acciones de diseño producidas por cargas gravitacionales y laterales, sean capaces de generar deformación sin llegar al colapso, sin embargo, año tras año, los agentes climatológicos consecuencia de la naturaleza y acciones humanas se presentan con mayor frecuencia e intensidad en el planeta.

En los últimos años las estadísticas registran incrementos en las temperaturas alrededor del mundo, así como también temperaturas que descienden rápidamente, provocando gradientes importantes de temperatura; Uno de los temas mas relevantes a investigar en los últimos años ha sido mantener las temperaturas ideales dentro de las edificaciones. Actualmente mas del 90% del tiempo en un día se realizan actividades en sitios interiores (Cao, 2016), por lo que es necesario el uso e investigación del comportamiento de materiales mas resistentes y con mejores propiedades térmicas que contribuyan a la disminución del alto consumo de energía eléctrica generada por los sistemas de enfriamiento y calefacción.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se presenta un estudio para investigar el comportamiento térmico de una estructura de mampostería confinada ubicada en el Campus del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, dicha estructura está expuesta a las condiciones climáticas extremas que se viven en la zona de Monterrey; Mediante el uso de sistemas eléctricos de medición se obtuvieron las temperaturas externas de la estructura en estudio, con el objetivo de evaluar la transferencia calor durante un periodo de veinticuatro horas continuas en los días con la mayor y la menor temperatura registrada. Los datos obtenidos se usaron para alimentar el software conocido como Abaqus CAE, utilizado para desarrollar un modelo con el cual se simuló el análisis térmico de la estructura, posteriormente se desarrollaron otros modelos de la misma estructura pero utilizando diferentes propiedades de materiales de la región, tales como bloques de concreto ligero (BCL) y bloques de arcilla extruida (BAE).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los materiales usados en la construcción tienen propiedades físico-mecánicas que hacen una estructura resista los esfuerzos mecánicos generados por la acción de las cargas muertas, vivas, sísmicas, de viento, etc. sin embargo, en la actualidad y debido al desconocimiento, es de poca importancia saber si el material o el elemento presenta propiedades térmicas que permitan retardar el flujo de la transferencia de calor, para mantener una temperatura en el interior de

la estructura que se adapte a los estándares de confort térmico.

Debido al calentamiento global, las temperaturas de todo el mundo se han incrementado notoriamente (Romero, 2017). En la zona de Monterrey las temperaturas fluctúan entre 40 y 50 °C durante verano, y descendiendo entre 0 a 10 °C en el invierno (Ríos, 2011); el cambio climático es el principal causante de estas variantes, los rayos del sol penetran a la atmósfera del planeta y esta a su vez capta la energía y la convierte en calor provocando el “efecto invernadero”, el cual suscita el calentamiento de la superficie terrestre y evita el escape de gases, principalmente el dióxido de carbono (CO₂).

El aumento de este gas (CO₂) (Sakalli, 2017) es el resultado del uso excesivo y la explotación de los recursos naturales, combustibles fósiles, la tala descontrolada de arboles, el aumento de la producción industrial, etc., sin embargo el ser humano es quien provoca mas del 75% de esta emisión, él mismo es quien debe presentar alternativas en sus sistemas constructivos.

Actualmente los edificios y la mayor parte de las construcciones reciben un mayor calentamiento, incrementando la temperatura interior de las edificaciones, reduciendo índices de confortabilidad y produciendo un aumento en el sector energético local y global, esto lleva al siguiente cuestionamiento, ¿cuál es la mejor opción dentro de los materiales convencionales para reducir los efectos del flujo del calor dentro de las construcciones?

1.3 HIPÓTESIS

- 1.- Existe una relación muy estrecha entre los resultados obtenidos del software Abaqus CAE y los valores obtenidos de la lectura de temperaturas de la estructura.
- 2.- Los materiales que presentan bajos valores de densidad y conductividad térmica, conservan mejor la temperatura interior de la edificación.
- 3.- Las construcciones que se encuentran recubiertas con materiales como mortero cemento-arena y yeso en sus superficies presentan un mejor desempeño térmico mas eficiente.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La mayor parte de las edificaciones en la zona norte del país están construidas bajo sistemas de mampostería, utilizando materiales comerciales, elaborados generalmente de cemento-arena, en casos inusuales se presentan construcciones con distintos materiales o técnicas de construcción alternas, por ello la justificación de la presente investigación se basa en la necesidad de ampliar el panorama de soluciones accesibles para nuevas construcciones en la Ciudad de Monterrey, debido a que no se ha prestado suficiente atención en la investigación en esta área, llevando al desconocimiento de las opciones existentes para construir y por lo tanto al uso de los mismos materiales desde hace un largo tiempo.

El uso de la mecánica computacional aplicada a este trabajo (Del Coz Díaz, 2007), surge de la necesidad de desarrollar modelos que reproduzcan el comportamiento térmico de estructuras con materiales de la zona, en este caso debido a la exposición ambiental del clima extremo de la zona, además de ser una excelente opción, capaz de predecir resultados confiables.

Este trabajo considera un alto impacto en el aspecto económico, ya que con los resultados obtenidos de los modelos de transferencia de calor, será posible definir qué material o sistema constructivo tiene un mejor comportamiento bajo esta acción.

Respecto al impacto ambiental, esta investigación se justifica debido a que aproximadamente el 19% de la energía total consumida en el país es generada por edificios residenciales y comerciales (Griego, 2015), los cuales se han hecho dependientes del uso de sistemas de aire acondicionado, por lo tanto al presentar alternativas de construcción, representará un ahorro de energía a corto, mediano y largo plazo.

Así que brindar diferentes soluciones de materiales de construcción beneficia tanto al constructor como a quien habitará en la edificación, además de prevenir el futuro aumento de las temperaturas extremas en las próximas décadas según la Organización de la Naciones Unidas (IPCC,2007).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Investigar los efectos térmicos sobre construcciones basadas en mampostería en la zona de Monterrey, Nuevo León.

1.5.2 Objetivos particulares

- a. Desarrollar un modelo computacional de la estructura en estudio mediante la técnica de los elementos finitos, basado en el uso del software conocido como Abaqus CAE.
- b. Comparar la respuesta térmica teórica de la estructura contra respuestas similares de investigaciones alternas.
- c. Una vez concluida la investigación proponer y fomentar el uso de materiales para construcción con mayor capacidad térmica, a través de instancias como el Reglamento de Construcción del Estado de Nuevo León para construcciones futuras en la región.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES DE PROYECTO

Se modeló únicamente la cuarta parte de toda la estructura existente, debido a la carga computacional y a las limitaciones del software utilizado.

La entrada de datos iniciales fue obtenida a través de la literatura e investigaciones previas, debido a la limitación de medios para realizar un programa experimental para obtener los datos precisos de la estructura.

Se realizó la toma de temperaturas únicamente durante 24 horas en el día con la temperatura mas elevada y el día con la mas baja, puesto que este lapso de tiempo se considera suficiente para esta investigación y basado en investigaciones previas.

Las comparativas entre los resultados obtenidos por el modelo computacional y los modelos obtenidos mediante la lectura de datos, tiene como fin validar el modelo analítico que se implementa en esta investigación.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 ASPECTOS GENERALES

2.1.1 Temperaturas en el país

México es un país que debido a su situación geográfica se encuentra dividido por el Trópico de Cáncer, separando el país en dos zonas climáticas, la zona tropical y la zona templada.

El clima del país es difícil de generalizar, debido a la presencia de océanos y relieves tan diversos que se pueden encontrar en el país, desde llanuras costeras hasta montañas altas, sin embargo, sin importar la posición geográfica del país, en general el clima de México es caliente y templado, y la mayor parte del país tiene un clima soleado que predomina durante todo el año.

Las temperaturas altas gobiernan la mayor parte del país; Cuando se habla de temperaturas altas, esto se refiere a aquellas que en promedio sobrepasan 32°C, asimismo al hablar de temperaturas bajas, se pueden definir por aquellas no mayores a los 10 °C.

La temperatura y el calor son conceptos que pueden confundirse, se define como calor a la cantidad de energía que es liberada por el movimiento de las partículas transitadas de un sistema a otro y la temperatura es la unidad de

medida referida a la noción del calor de un sistema termodinámico en un valor escalar (Barbosa *et al*, 2016)

2.1.1.1 Ciudad de Monterrey

La ciudad de Monterrey, en el estado de Nuevo León, tiene un tipo de clima semiárido cálido y se caracteriza por sus condiciones extremas tanto en verano como en invierno.

La temperatura media se encuentra de 24 a 25 °C, sin embargo, se presentan amplitudes térmicas elevadas que superan en múltiples ocasiones los 40 °C, mientras que las mínimas suelen descender por debajo de los 0 °C.

La temporada de calor, predomina durante la mayor parte del año, presentándose entre los meses de mayo hasta agosto, donde la temperatura máxima promedio diaria es de 32 °C y la temperatura mínima promedio es de 23 °C. La temporada de frío, tiene una duración aproximada de 2.4 meses, durante los meses de noviembre hasta febrero, la temperatura máxima promedio diaria es de 24 °C y la mínima promedio es de 10 °C durante estos meses.

En la Figura 1 se presentan los valores promedio de temperatura durante el año, se puede observar que el periodo de temperaturas altas gobiernan en la ciudad como se menciono anteriormente, mientras que las temperaturas bajas únicamente se presentan en un periodo muy corto.

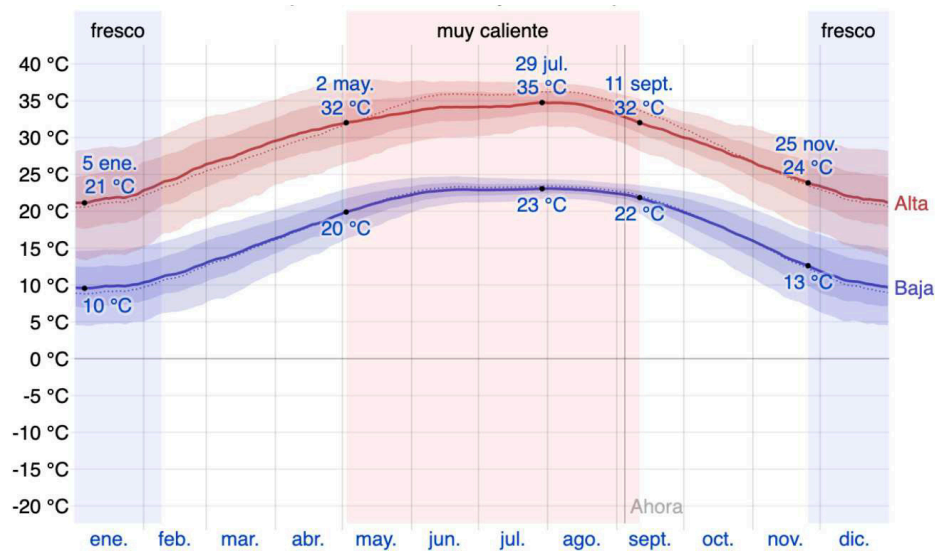


Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas promedio anuales (Weather Spark, 2019)

A continuación se presenta un mapa de contorno en la Figura 2 de las temperaturas promedio por hora durante todo el año en la Ciudad de Monterrey, el eje horizontal representa los meses del año mientras que el eje vertical el tiempo que varia de 00:00 a 24:00 horas.

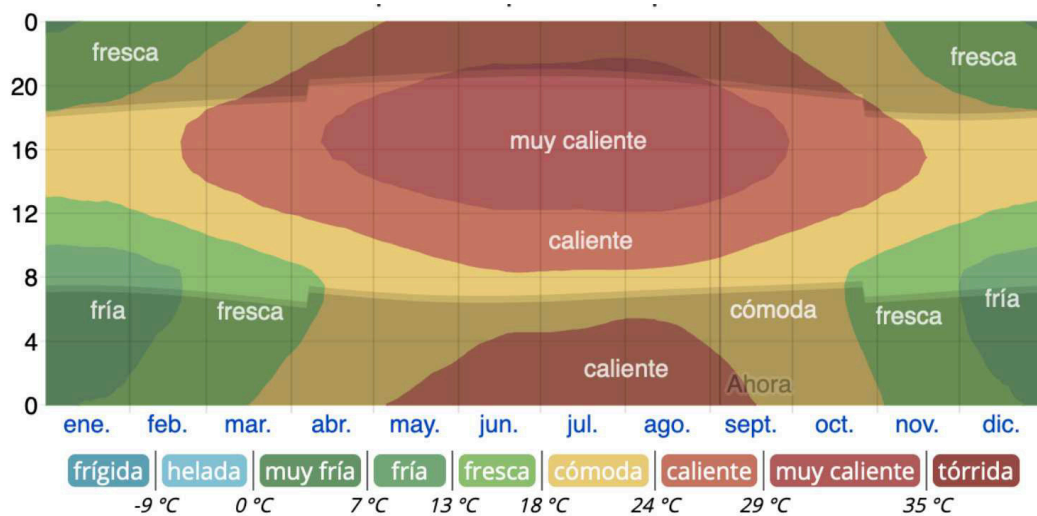


Figura 2. Temperatura promedio por hora anual

La gráfica de contorno de colores muestra las temperaturas promedio registradas a lo largo del año, mientras que aquellas zonas sombreadas simbolizan la entrada y salida del sol. Se muestra que en los meses de julio y agosto se presentan las temperaturas mas altas de las 12:00 hasta las 20:00 horas, durante los meses de enero y febrero se presentan con mayor intensidad las temperaturas bajas durante las primeras horas del día de 00:00 hasta las 08:00 horas.

En relación a la humedad, en Monterrey la humedad varía de manera extrema, en la Figura 3 se muestra el nivel de la humedad categorizado por el punto de rocío, el periodo más húmedo promedio del año dura aproximadamente 6 meses, este presenta un ambiente de comodidad entre bochornoso, opresivo e insoportable por lo menos durante un 18% del tiempo y en promedio el día mas húmedo del año es el 4 de septiembre, con humedad del 72% del tiempo.

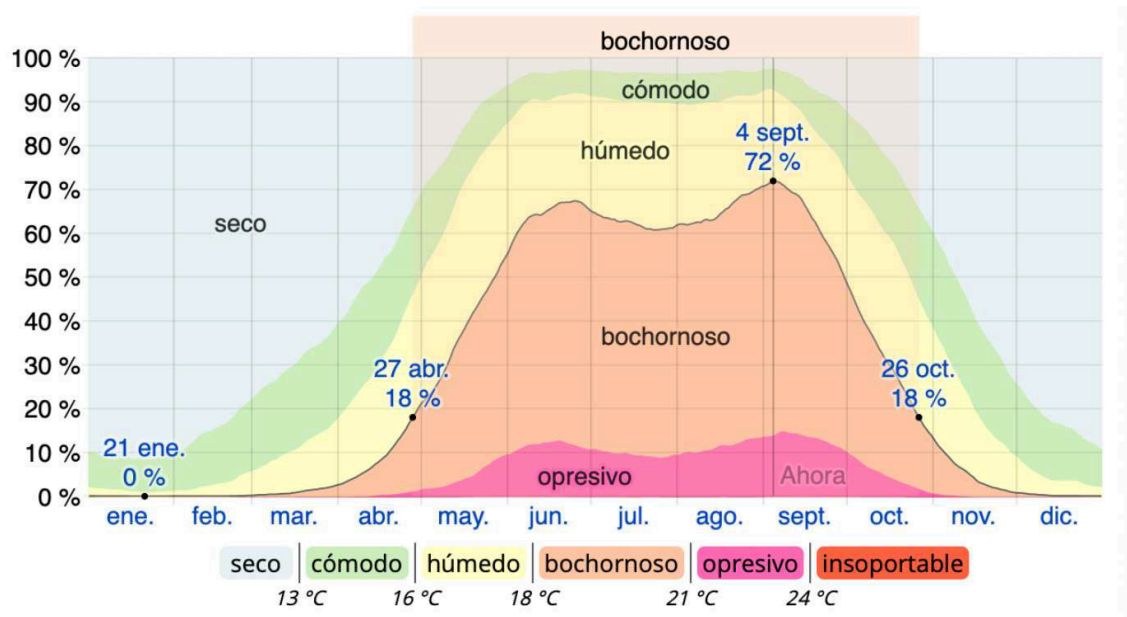


Figura 3. Niveles de comodidad de la humedad (Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, 1982)

2.1.1.2 Estado de Nuevo León

Situado en el extremo noreste de la República Mexicana, localizado entre los paralelos 23°10'00" y 27°47'30" de latitud norte y entre los 98°24'38" y 101°12'9" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich.

En el estado se presenta un clima muy variable debido a los relieves que forman la Sierra Madre, predominan los climas semisecos extremosos y la precipitación pluvial es muy escasa.

En la siguiente tabla se presentan las temperaturas medias anuales por regiones del estado de Nuevo León.

Tabla 1. Temperatura media anual por regiones y municipios de Nuevo León (INEGI, 2017)

Región o Municipios	Máxima (°C)	Meses	Mínima (°C)	Meses
Gran llanura de Norteamérica	28-29	julio	14-15	enero
Lampazos, Naranjo, Sabinas Hidalgo, Vallecillo y Aldama	30-31	julio y agosto	13-14	enero y diciembre
Melchor Ocampo, General Treviño, General Bravo y Los Aldama	27-28	julio y agosto	15	enero
Cadereyta Jiménez, Pesquería, Juárez, Cerralvo y Los Ramones	29-30	julio	14-15	enero y diciembre
Abasolo, Hidalgo y Salinas Victoria	25-26	julio	15-19	enero
Doctor Arroyo, Aramberri, Galeana y García	22-23	julio y agosto	14-15	enero y diciembre
Santiago, Aramberri y General Zaragoza	27-28	julio y agosto	13-14	enero y diciembre

En resumen, el clima del estado de Nuevo León se puede apreciar en la Figura 4 por extensión territorial: semiárido subhúmedo (19.59%), muy cálido y cálido semiseco (18.01%), muy cálido y cálido seco (16.81%), semiárido seco

(13.93%), templado seco (7.43%), templado subhúmedo (6.86%), semiárido semiseco (6.16%), templado semiseco (6.09%), semicálido muy seco (4.83%) y semifrío subhúmedo (0.29%).

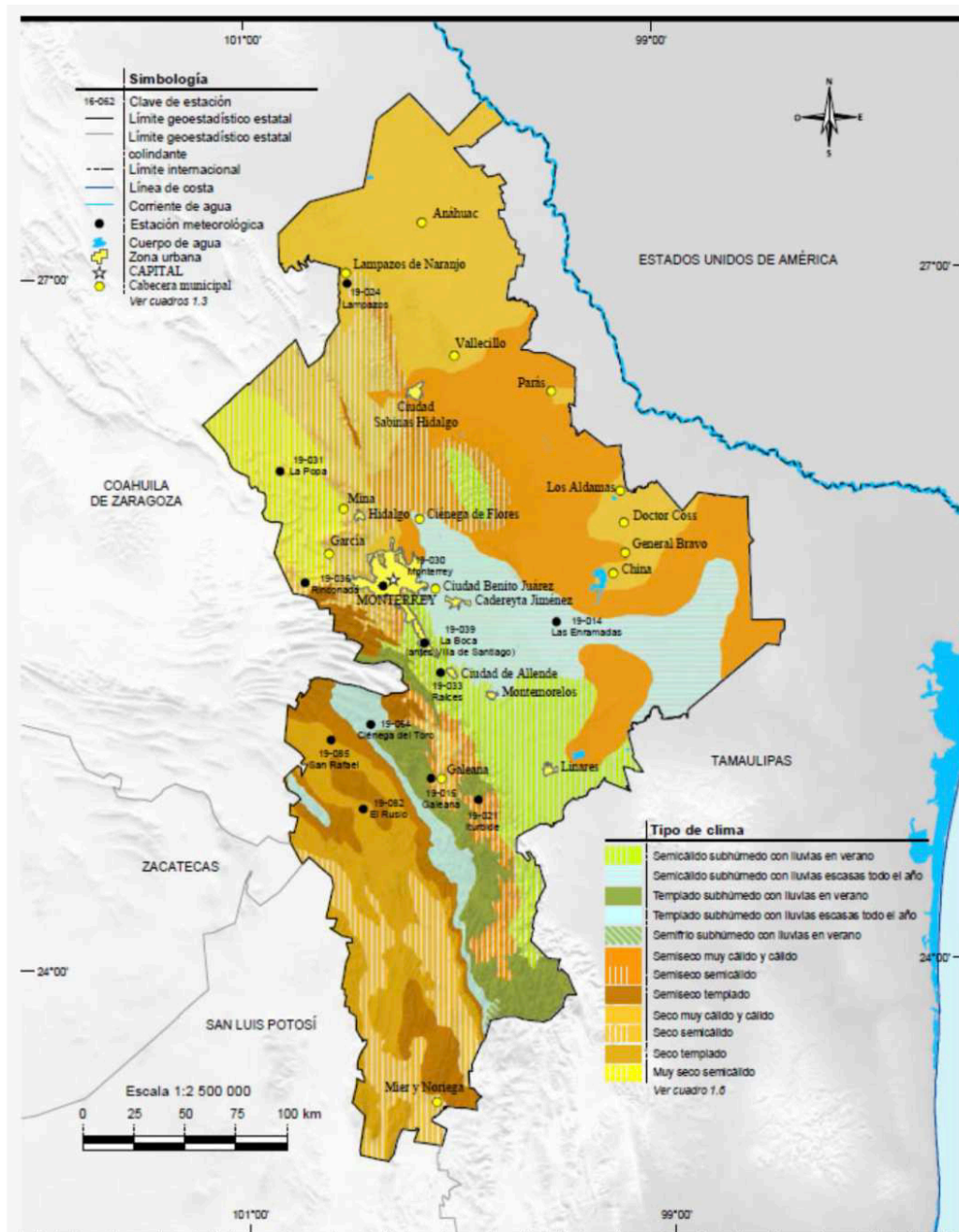


Figura 4. Datos cartográficos de la Carta de Climas de Nuevo León (INEGI, 2017)

2.1.1.3 Zona norte

Se considera que la región norte del país, se encuentra situada en su mayoría en la zona subtropical del hemisferio norte. La temperatura se ve influenciada mas con la altitud que con la latitud, la región del norte y noreste es mas baja con respecto al nivel del mar y por lo tanto es mas caliente, teniendo temperaturas medias anuales entre los 22 y 24 °C para el noreste, 18 a 22 °C para el norte central y 22° a 26 °C para el noroeste, por lo que se considera zona semicálida, por su contraparte en el sur y en el oeste la temperatura media anual es del orden de 12° a 18 °C, es decir clima semifrío; una de las características de los climas del norte de la Altiplanicie es su aridez, clima donde la evaporación excede la precipitación (Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, G. e I.,1982).

2.1.1.4 Zona centro

La zona norte del país tiene temperaturas medias anuales entre 18 y 22 °C, por lo que se le considera como semicálido, para regiones del valle de Guadalajara, los Altos de Jalisco y el bajío.

Las ciudades como Morelia, Toluca y México presentan como climas semifríos, donde las temperaturas anuales disminuyen a valores menores de 12 °C, con temperaturas medias anuales de 12 a 18 °C.

Los climas fríos con temperatura media anual entre -2 y 5 °C se localizan en las zonas de mayor altitud, donde se encuentran volcanes como el Popocatépetl, Itzaccíhuatl, Nevado de Toluca y Malinche, con altitudes comprendidas entre los 4000 y 5000 m. Por sus temperaturas, los climas varían de cálidos en los cañones

de Juchipila (Zacatecas) y Bolaños (Jalisco) y algunas cuencas de ríos, climas muy fríos o de nieves permanentes sobre la Sierra Nevada, pasando por semiáridos, templados y semifríos (Vidal, 2005)

2.1.1.5 Zona sur

A lo largo del año, las temperaturas registradas en esta región del país se encuentran por encima de los 22 °C, sin embargo, en zonas como la llanura costera del Pacífico la temperatura supera los 26° C debido a su clima cálido. La región de la Sierra Madre de Chiapas, tiene un clima templado con temperaturas no menores a los 18 °C.

Los climas de esta región varían de húmedos a subhúmedos y de cálidos a semifríos, los fríos solo se pueden encontrar en la cúspide del Volcán de Tecaná. El istmo de Tehuantepec, ejerce una influencia en esta zona, porque a pesar de que su relieve es bajo, influye en la distribución de la temperatura de esta región.

En resumen, la diversidad de los climas en el país es extensa, los climas cálidos predominan a lo largo del año, sin embargo, es posible determinar su clima dominante por humedad y por temperatura como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Principales características de las regiones climáticas de México (Vidal, 2015)

Región	Clima dominante por su humedad	Clima dominante por su temperatura
Norte	Muy secos Secos Semisecos	Semicálidos Templados
Noroeste	Muy secos Semisecos Subhúmedos	Cálidos Semicálidos Templados Semifríos
Noreste	Secos Semisecos Subhúmedos	Cálidos Semicálidos Templados Semifríos
Centro	Semisecos Subhúmedos	Semicálidos Templados Semifríos Fríos
Sur	Subhúmedos Húmedos	Cálidos Semicálidos Templados

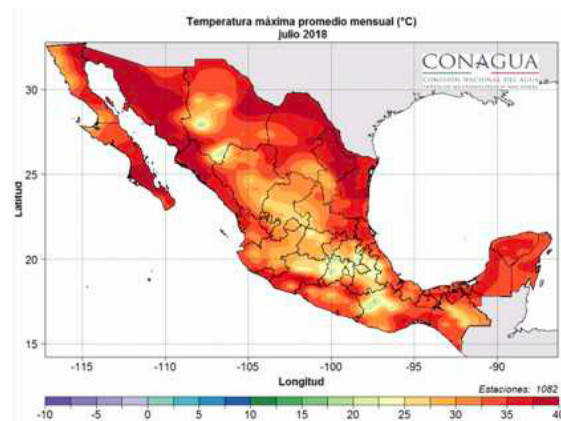
2.1.2 Registro histórico de temperaturas en Nuevo León

El incremento de las temperaturas en la zona norte del país es cada día mas frecuente, temperaturas extremas que afectan directamente el interior de las edificaciones, los medios de comunicación difunden pronósticos del estado del tiempo, por lo tanto existe un registro histórico de la evolución de las temperaturas desde un par de décadas atrás. Los sistemas meteorológicos son capaces de medir tanto la temperatura como la sensación térmica, la humedad relativa, la velocidad del viento, precipitación, por lo que es posible confundir el clima con estado del tiempo, siendo este ultimo lo que percibimos (Conde,2011).

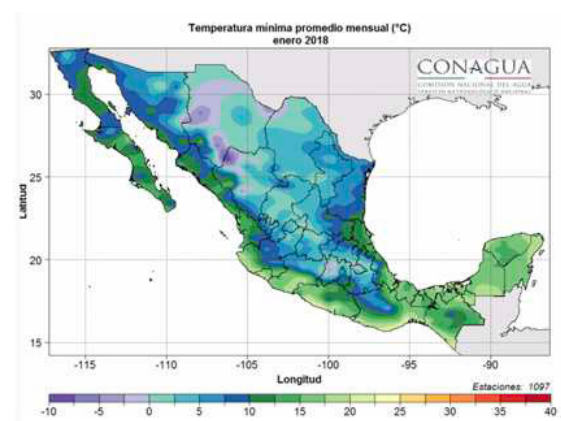
El clima esta asociado a una región en específico, la zona norte del país se caracteriza por ser mayormente seco extremo, con temperaturas muy altas durante el día y muy bajas durante la noche, así como muy altas en el verano y

muy frías en el invierno (CONEVYT, 2009), por ello, parte de los objetivos de esta investigación es proporcionar información sobre las piezas y sistemas de revestimiento que mejoran el desempeño térmico de las estructuras de mampostería.

El año 2018, año que comprende parte de esta investigación, se registro un gradiente de temperatura significativo entre los meses de invierno a verano, temperaturas con diferencias del orden de 40 a 45 °C como se muestra en las Figuras 5 a y 5 b.



a)



b)

Figura 5 a) Temperatura máxima promedio mensual (°C) julio 2018; b) Temperatura mínima promedio mensual (°C) enero 2018 (INEGI, 2018)

Según el IPCC 20 (2007) el aumento de temperaturas se encuentra distribuido alrededor de todo el planeta, impactando con mas presencia y velocidad en la superficie terrestre que en la superficie oceánica, la tendencia de este aumento es cuasi-lineal, por lo que se espera que si no son tomadas acciones de prevención en los próximos años, el planeta sufriría los efectos del calentamiento global incrementando 1.5 °C su temperatura, según los datos publicados por el IPCC (2018).

Localmente, en el año 2010 fue publicado un documento referente a la situación que se vivía en la ciudad de Monterrey, Nuevo León debido a las temperaturas extremas que se presentaron durante el invierno. Aplicando la distribución de Gumbel (Ríos, 2011), se estimaron niveles y periodos de retorno para aportar información ante los riesgos climatológicos, esta investigación obtuvo los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Registro de temperaturas mínimas del periodo 1993-2009 (Ríos, 2011)

Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Temp. mínima (°C)	1.70	1.45	2.75	-3.60	-1.70	0.25	-0.10	2.00	0.15
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Temp. mínima (°C)	-3.15	0.20	-1.95	1.01	1.08	-1.30	-0.72	2.49	

Sin embargo estos datos, fueron los últimos publicados sobre la situación climatológica en la ciudad de Monterrey.

A través de la búsqueda de registros anuales por sistemas meteorológicos de información, específicamente de la estación “Aeropuerto DEL NORTE INTL (MMAN)” se recabó lo siguiente expuesto en la Tabla 4:

Tabla 4. Registro histórico de temperaturas anuales desde 1990-2018 (INEGI, 2018)

Año	Max (°C)	Min (°C)	Mes	Mes
1990	43	5	Mayo	Diciembre
1991	41	4	Agosto	Enero
1992	44	1	Junio	Enero
1993	42	0	Junio	Octubre
1994	42	1	Junio	Febrero
1995	44	4	Mayo	Enero
1996	41	-3	Junio	Diciembre
1997	41	0	Agosto	Enero
1998	45	1	Junio	Diciembre
1999	44	1	Mayo	Enero
2000	43	1	Mayo	Diciembre
2001	41	0	Junio	Enero
2002	44	3	Mayo	Diciembre
2003	44	0	Junio	Enero
2004	42	-2	Mayo	Diciembre
2005	43	3	Julio	Diciembre
2006	42	2	Abril	Diciembre
2007	40	1	Junio	Enero
2008	44	2	Mayo	Diciembre
2009	42	3	Julio	Enero
2010	41	-3	Abril	Enero
2011	43	-5	Junio	Febrero
2012	45	2	Mayo	Diciembre
2013	41	3	Mayo	Diciembre
2014	40	1	Julio	Enero
2015	38	2	Agosto	Enero
2016	38	1	Mayo	Diciembre
2017	41	0	Junio	Enero
2018	40	-2	Julio	Enero

2.1.3 Panorama energético nacional y global

Con la aprobación de la reforma energética (2014), se ha buscado apoyar a que el sector energético reduzca el consumo de la energía eléctrica mediante dos principales factores: la conservación de la energía y la eficiencia energética, así se podrá disminuir la demanda de energía y los gases del efecto invernadero.

Tan solo en el sector público de Monterrey, el uso de la energía eléctrica en los edificios representa la segunda mayor demanda de energía con 12.39%, solo por debajo del alumbrado público con 78.29%, esto representa un área de oportunidad para la reducción de la demanda a través del estudio y mejora del comportamiento térmico de los materiales de construcción.

En el panorama nacional Molar Orozco (2017), afirma que cerca del 20% de la energía consumida proviene de los edificios, sin embargo actualmente no existe una base de datos oficial de referencia comparativa del consumo de energía eléctrica en los edificios (Griego,2015).

A nivel mundial, se presenta una situación similar, el consumo de energía esta en una crisis que requiere una solución inmediata, el alto consumo de energía en los edificios representan cerca del 50% de la energía total consumida, debido a la iluminación, ventilación y los sistemas mecánicos de climatización (Bassiouny, 2016), sin embargo, se encontró que en algunas ciudades como Estambul, Dubái,, El Cairo, etc., el porcentaje de consumo a causa de estos sistemas alcanza el orden de 70% (Al-Hazmy, 2016).

La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 2017), reportó que el uso de materiales aislantes en la construcción y la optimización de los edificios mejoran el desempeño térmico de la estructura mediante la conservación de energía, reduciendo la perdida o ganancia del calor, esto trae consigo la reducción de la temperatura. No obstante, el precio de los materiales que actúan como aislante térmicos, es decir aquellos que manejen un valor de conductividad térmica por debajo de 0.05W/mK (Remesar, 2017), tienden a tener un valor mas alto en el mercado que aquellos

materiales convencionales para la construcción.

Debido a que en México aproximadamente 51.2% (CONEVAL, 2016) de los mexicanos se encuentran en situación de pobreza a pobreza extrema, los sistemas de construcción mas utilizados para la vivienda son los bloques de concreto hueco y el concreto armado (Huelsz, 2013) ya que su costo es accesible, esto lleva a la interrogante, ¿cuál es la manera de mantener la temperatura dentro de los índices de confort térmico en las edificaciones y que en paralelo reduzca la demanda de energía eléctrica sin el uso de materiales aislantes térmicos?, Mehdi Robati (2016), afirma que los agregados así como sus características, presentan un efecto significativo en las propiedades físicas del concreto, como por ejemplo la absorción de la humedad y la conductividad térmica, dichas propiedades contribuyen a la transmisión de la carga térmica y definen el confort térmico en el interior de la edificación (Bassiouny, 2016).

2.1.4 Confort térmico

Los estándares internacionales utilizan la definición de confort térmico como “Aquella condición en la que la mente proporciona satisfacción con el ambiente térmico” (Fanger, 1973), sin embargo, Castilla (2010) argumenta que esa definición es ambigua debido a que se dejan abiertos los conceptos de “condición de la mente” y “satisfacción”, por otro lado, se encuentran correctamente deducidos los términos sobre el juicio del confort. La manera de obtener una medición del confort térmico se realiza a través de un índice, desarrollado por Fanger en, el índice PMV por sus siglas en ingles (Predicted Mean Vote), el cual evalúa la sensación térmica experimentada durante un periodo de tiempo prolongado en una escala (Liang et

al, 2005) de siete valores del orden de -3 a +3 con tolerancia de +/- 0.5 (Ver tabla 5).

Tabla 5. Escala de sensación para confort térmico (Fanger, 1973)

PMV	Sensación
3	Muy caluroso
2	Caluroso
1	Ligeramente caluroso
0	Neutralidad térmica
-1	Fresco
-2	Frío
-3	Muy frío

Este índice es dependiente de los parámetros anteriormente mencionados, que si bien parecen ser subjetivos de acuerdo al evaluador, sin embargo se mantiene dentro de un rango finito de posibilidades (ver Tabla 6):

Tabla 6. Parámetros de evaluación para índice de confort térmico (Fanger 2917)

Parámetro	Rango
Actividad metabólica	0.8 a 4 (W/m^2):
Aislamiento de la ropa	0 a 2 ($\text{m}^2\text{C/W}$)
Temperatura del aire	10° a 30° C
Temperatura radiante media	10° a 40° C
Velocidad del aire	0 a 1 m/s
Humedad relativa	30 a 70 %

Dichos parámetros se definen como:

a) La actividad metabólica (W/m^2): es la cantidad de calor que se genera dependiendo del nivel de actividad del o los ocupantes, mediante el metabolismo muscular, este parámetro afecta la percepción de la sensación térmica significativamente (Castilla,2010).

b) El aislamiento de la ropa ($\text{m}^2\text{C/W}$): es la cantidad de vestimenta que utiliza el ocupante para protegerse de las condiciones ambientales, dependiendo de la sensación térmica del ambiente este aislamiento puede ser mínimo para favorecer la evaporación del sudor en climas húmedos, en presencia de clima cálido, el aislamiento debe concentrarse en evitar la radiación solar hacia el cuerpo y para sensación térmica fría, la vestimenta debe evitar pérdidas del calor (Castilla, 2010).

c) La temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$): establece la temperatura a la que se encuentra el aire seco que rodea al ocupante.

d) La temperatura radiante media ($^{\circ}\text{C}$): esta existe debido la radiación entre las superficies que rodean al ocupante, esta temperatura incide de forma directa en la manifestación de la sensación térmica, si la temperatura del sujeto es mayor, este cederá calor por radiación, si los cuerpos que lo rodean tienen mayor temperatura, el sujeto recibirá el calor (Herrera, 2015).

e) La velocidad del aire (m/s): se define como la velocidad del flujo de aire que se desplaza en el interior de la edificación, incidirá de manera directa en el balance térmico.

f) La humedad relativa (%): es el valor de la humedad que existe en el ambiente, influyendo si el lugar cuenta con zonas con presencia de agua, la transpiración de los ocupantes y las condiciones del clima exterior invariablemente (Herrera, 2015).

Por lo tanto, basado en el documento Standard 55, es posible afirmar que un ambiente térmico confortable se encuentra en el orden de los 20 hasta 24 $^{\circ}\text{C}$ ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ cuando la velocidad del viento esta en el rango de 0 a 0.2 m/s , si este

parámetro comienza a incrementarse, es aceptable un aumento también en la temperatura aproximadamente entre los 25 a 27 °C.

2.2 LEYES DE LA TERMODINÁMICA

Todos los fenómenos físicos que ocurren en la tierra están gobernados por las leyes universales de la termodinámica, esta ciencia explica a detalle estos fenómenos, analizando los efectos térmicos en los sistemas, tal como la transformación de la energía y la transferencia de calor (Barbosa *et al*, 2016).

Dentro de los conceptos fundamentales de esta área, es necesario conocer las propiedades termodinámicas que posee un sistema en un momento específico, debido a que existen propiedades que son dependientes de la evolución en el tiempo del análisis; Las propiedades termodinámicas son (ver Tabla 7):

Tabla 7. Propiedades termodinámicas de la materia

Propiedad	Definición
Peso	Se relaciona con la fuerza gravitacional al ser ejercida sobre el sistema. La aceleración de la gravedad (g) determina su magnitud, para el sistema internacional (SI) el valor de la gravedad es de $g=9.806\text{m/s}^2$ (Barbosa <i>et al</i> , 2016).
Masa	Se define como la materia existente dentro del sistema, su unidad de medida en el sistema internacional (SI) es el kilogramo (Howells, 2015)
Volumen	Este concepto especifica la cantidad de espacio que ocupa dicho sistema delimitado por una frontera, la unidad de volumen en el sistema internacional (SI) es el m^3 (Liang <i>et al</i> , 2005).
Densidad	Relación entre la cantidad de masa delimitada por una unidad de volumen, su dimensión en el sistema internacional (SI) son el kg/m^3 (Barbosa <i>et al</i> , 2016).
Temperatura	Resultado de la cantidad de calor que existe en el ambiente o en un sistema, asociando la sensación térmica de frío o calor, si la cantidad de calor aumenta, la temperatura incrementara (Howells, 2015).

El intercambio de temperatura entre sistemas, involucra la aplicación de las leyes de la termodinámica, la ley cero, primera, segunda y tercera ley.

Formulada por Ralph Fowler (1931), la Ley Cero, establece que al existir dos sistemas llamados por conveniencia A y B, y al encontrarse separados, lograrán el equilibrio térmico con un tercer sistema llamado C; A y B estarán en equilibrio térmico uno del otro, como se muestra en la Figura 6.

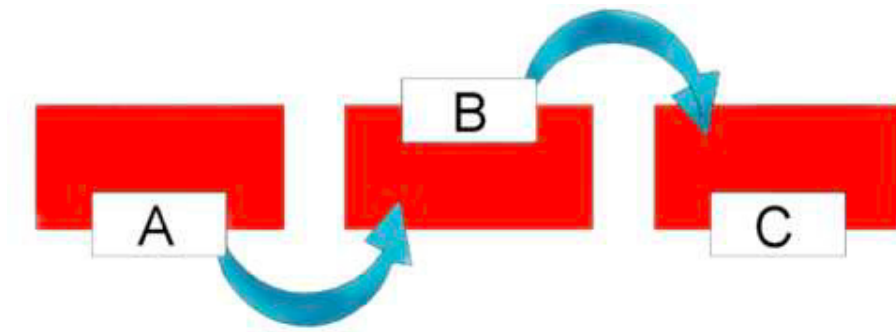


Figura 6 Diagrama de la Ley Cero de la termodinámica (Cengel, 2011)

El concepto de equilibrio térmico es un punto de gran envergadura en esta investigación y se define como baja o nula interacción de cambios químicos dentro de un sistema o falta de gradientes de temperatura, con esta definición se abre paso a la primera ley de la termodinámica, la cual establece que el cambio de la energía interna de un sistema es igual al calor total que se transfiere, mas el trabajo total que se hace sobre el sistema, el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

Donde:

ΔU : Cambio de energía interna

Q : Cantidad de calor transferido

W : Trabajo total sobre el sistema

Dicha ley es en realidad el principio de la conservación de la energía, expresando que la energía no se puede crear ni destruir, solo puede cambiar de forma, por lo tanto esta puede transferirse hacia un sistema a través de los mecanismos de calor (Q) y trabajo (W).

2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se define como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura, dicha energía es liberada por el movimiento de las moléculas y átomos de un sistema (Cengel, 2011). Para la comprensión de este intercambio es necesario definir las variables que rigen el proceso de transferencia, la cantidad de calor transferido se expresa como Q , cuando esta cantidad de calor se encuentre sujeta a un tiempo definido se llama razón de transferencia de calor, por lo tanto se habla de una derivada respecto al tiempo o por unidad de tiempo, llamado Q' :

$$Q = \int_0^{\Delta t} Q' dt \quad (2)$$

Donde:

Q : cantidad de calor transferido

Q' : derivada de Q respecto al tiempo

Δt : gradiente de tiempo

Si esta transferencia de calor por unidad de tiempo busca ser aplicada a través de una área donde la recepción de la energía sea de manera perpendicular se le conoce como flujo de calor, indicado por la expresión:

$$q' = \frac{Q'}{A} \quad (3)$$

q' : cantidad de calor transferido por unidad de área

A : área

2.3.1 Mecanismos de transferencia de calor

La propagación del calor se manifiesta de distintas maneras según el medio, para que este fenómeno ocurra es necesario la existencia de diferentes temperatura entre los sistemas y es considerada como un proceso irreversible en el espacio (Del Coz Díaz, 2006).

El intercambio de energía interna entre elementos individuales es un hecho que ocurre en todos sus casos del elemento con mayor cantidad de calor (temperatura mas elevada) hacia el de menor cantidad (ver Figura 7), este proceso de transferencia se da a través de tres mecanismos: conducción, convección y radiación, cada uno de estos, puede ser representado mediante un modelo matemático que determina la cantidad de calor que fluye sobre una superficie.

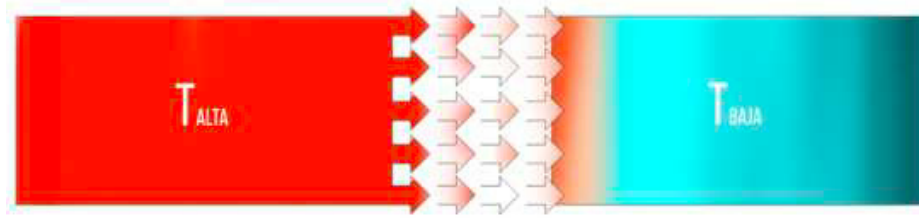


Figura 7. Dirección de transferencia de calor (García, 2019)

2.3.2 Conducción

El mecanismo de transferencia por conducción es el resultado de la transferencia de energía de moléculas entre ellas, debido a una variación de temperatura en el medio (Del Coz Díaz, 2005), este proceso se manifiesta de las moléculas mas energéticas hacia las menos energéticas.

Este mecanismo tiende a tener mayor presencia cuando las moléculas se desplazan a través de sólidos, esto se debe a la vibración la retícula de las partículas y al flujo de electrones libres, sin embargo la conducción también se presenta en fluidos (líquidos y gases), debido a la colisión y difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio.

La transferencia de calor se presenta de manera unidimensional, bidimensional y tridimensional, esto indica la dirección en la que el calor se desplaza sobre el sistema, en el caso particular de una pared plana (ver Figura 8) como muros de mampostería, la transferencia de calor se simplifica para trabajar en una sola dirección, el flujo de calor en las direcciones adyacentes a la normal son despreciables debido a que su magnitud es pequeña respecto a la normal (Cengel, 2011).

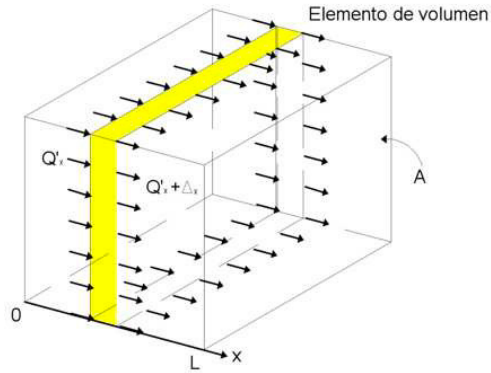


Figura 8. Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen en una pared plana grande (Cengel, 2011)

La transferencia de calor mediante la conducción unidimensional se define como el cociente de la diferencia de temperaturas que se encuentran en la frontera de un medio entre el espesor de este, por el producto del área de transferencia perpendicular al flujo y un valor de conductividad térmica propiedad del material del medio, esta razón de conducción se expresa de manera analítica mediante la siguiente expresión:

$$Q'_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4)$$

Donde:

Q'_{cond} : cantidad de calor transferido por conducción

k : valor de conductividad térmica

A : área de aplicación

T_1 : temperatura mayor

T_2 : temperatura menor

Δx : gradiente de distancia

ΔT : gradiente de temperatura

Esta expresión tiene como objetivo determinar la cantidad de calor que puede ser transferida por medio de un espesor determinado, según el material del elemento se determina un valor de conductividad (K), el cual determina la capacidad del mismo para conducir el calor a través de él, este modelo fue expuesto por primera vez por Jean Baptiste Fourier (1822) y se le conoce como la Ley de Fourier de la conducción térmica (Incropera, 1996), expresado de manera diferencial resulta:

$$Q'_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Donde:

Q'_{cond} : cantidad de calor transferido por conducción

k : valor de conductividad térmica

A : área de aplicación

$\frac{dT}{dx}$: razón de cambio de temperatura con respecto al espesor del medio

Es importante resaltar que la conductividad térmica del material del sistema no define el comportamiento del flujo de calor, sino las características del material, es decir la isotropía, ortotropía o anisotropía, si es homogéneo o heterogéneo determina la difusión del calor, dicha característica establece la rapidez del calor sobre el medio, esta propiedad de difusión se define como:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (6)$$

Donde:

ρC_p : capacidad calorífica del material

k : conductividad térmica del material

La capacidad calorífica, representa la habilidad que tiene un material para almacenar calor, nótese que entre mayor sea la difusividad térmica, el calor se propagará con mayor velocidad en el medio (Cengel, 2011).

Los elementos estructurales evaluados para esta investigación, no solo funcionan como pared plana (ver Figura 9a), sino que también fueron considerados para un análisis de transferencia de calor del tipo pared plana con capas múltiples (ver Figura 9b), al encontrarse físicamente cubiertos por capas de mortero en exterior y yeso en su interior, a esto se le conoce como un sistema compuesto.

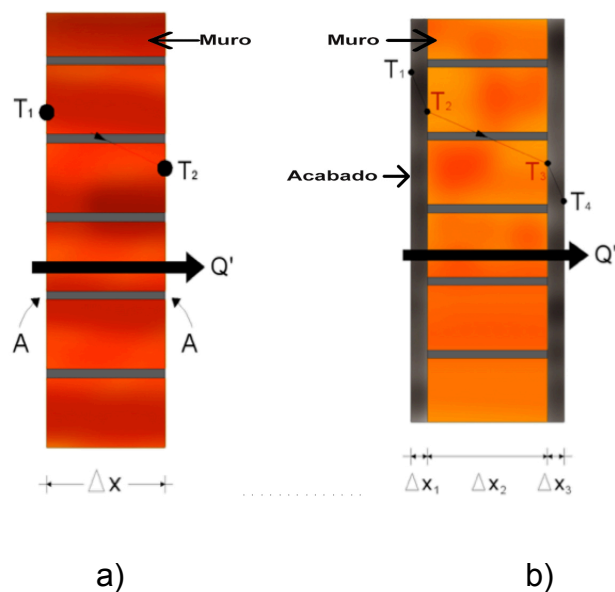


Figura 9. Conducción de calor unidimensional a través de pared plana a) Muro simple, b) Muro compuesto (Barbosa *et al*, 2016)

2.3.3 Convección

La convección es el medio de transferencia donde el calor únicamente se desplaza a través de fluidos como volúmenes de gases y líquidos, desde una zona

con una temperatura hacia otra zona con temperatura diferente (Del Coz Díaz, 2005), si la velocidad del fluido sufre un incremento, por consecuencia la cantidad de calor transferida será mayor.

Este mecanismo de transferencia se clasifica de dos maneras, la convección natural (ver Figura 10a) o libre siendo aquella en la cual el movimiento de los fluidos se da por medios naturales, y la convección forzada (ver Figura 10b), la cual es influenciada por medios externos que controlan, disminuyen o aumentan de manera controlada la velocidad del fluido.

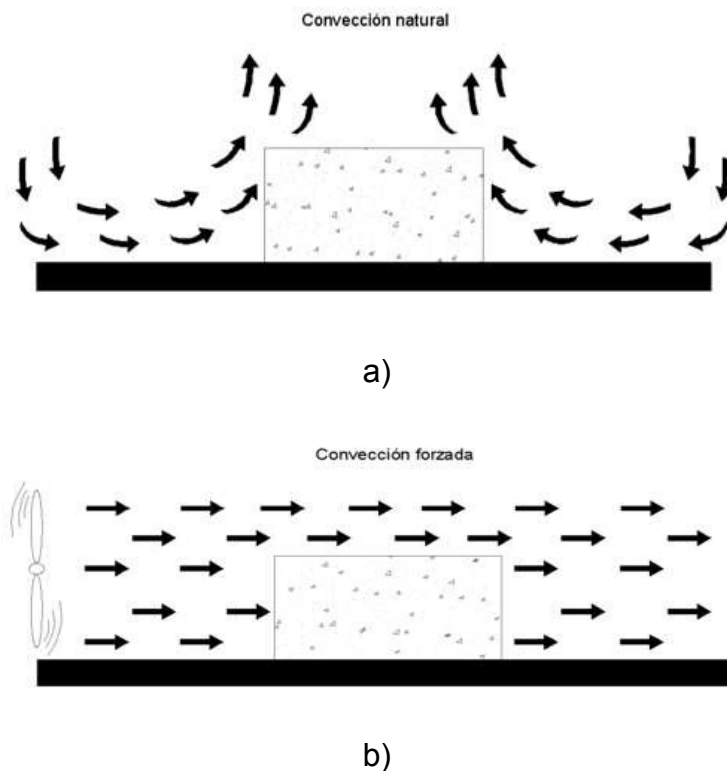


Figura 10. Esquema de distribución de fluidos en convección a) Libre, b) Forzada (García, 2019)

La razón de transferencia de energía a través de este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre dos sistemas, uno en reposo y

el segundo en movimiento, este fenómeno se encuentra regido por la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$Q'_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (7)$$

Donde:

Q'_{conv} : cantidad de calor transferido por convección

h : coeficiente de transferencia de calor por convección, libre o forzada, este valor representa la razón de la transferencia entre el medio fluido y el medio sólido

A_s : área superficial que recibe el calor

T_s : temperatura de la superficie

T_{∞} : temperatura del fluido suficientemente lejos del fluido

Es posible determinar el coeficiente de transferencia por convección (h) mediante la siguiente expresión:

$$h = \frac{-k_{fluido}(\frac{\partial T}{\partial y})}{T_s - T_{\infty}} \quad (8)$$

Donde:

k_{fluido} : coeficiente de conductividad del fluido

$\frac{\partial T}{\partial y}$: razón parcial de la temperatura respecto al tiempo definido por y

Sin embargo existen valores típicos para el uso de este coeficiente, delimitando el tipo de caso que se necesite analizar, ya sea convección libre o forzada de gases o líquidos y ebullición y condensación, este valor no es una propiedad del fluido, es un parámetro obtenido experimentalmente y cuyo valor depende de todas las variables involucradas en el fenómeno de convección, tales como, velocidad del fluido, estado del sistema, configuración geométrica del cuerpo, etc. (Incropera, 1996) .

2.3.4 Radiación

La energía de radiación es emitida por la materia a través de ondas electromagnéticas como resultado del cambio de configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas (Del Coz Díaz, 2005), este medio de transferencia de calor, no requiere de un medio interventor entre el emisor y el receptor cualquiera.

Es el mecanismo de transferencia de mayor velocidad, debido a que la energía se desplaza por ondas electromagnéticas, al ser un fenómeno volumétrico todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben y transmiten radiación.

Existe un modelo matemático que representa el fenómeno de la radiación emitida (Incropera, 1996) por un cuerpo negro (E) por unidad de tiempo y por unidad de área superficial, desarrollado por Joseph Stefan (1879), años mas tarde Ludwig Boltzmann verificó teóricamente esta relación, resultando la siguiente expresión:

$$E = \sigma T^4 \quad (9)$$

Donde:

σ : constante de Stefan-Boltzmann equivalente a $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

T : temperatura absoluta de la superficie en grados Kelvin (-273.15 °C)

Por lo tanto la relación de radiación que es transferida entre superficies se encuentra gobernada por la expresión:

$$Q'_{rad} = \sigma \varepsilon [(\theta - \theta^z)^4 - (\theta^0 - \theta^z)^4] \quad (10)$$

Donde:

Q'_{rad} : cantidad de calor transferida por radiación

σ : constante de Stefan-Boltzmann equivalente a $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

ε : coeficiente de emisividad

θ : temperatura del ambiente

θ^z : temperatura del cero absoluto

La radiación involucra propiedades en los materiales que determinan el comportamiento y la cantidad de flujo de calor que estos permiten, dentro de las propiedades básicas se encuentran la emisividad, que representa la relación entre la cantidad de radiación emitida por la superficie a una cierta temperatura y la cantidad de radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, los valores que la emisividad puede tomar dependerá del material del cuerpo, usualmente varia entre 0 y 1.

Cuando la radiación se presenta sobre una superficie se le conoce como irradiación, por naturaleza la capacidad de absorber, reflejar y transmitir energía (ver Figura X), cuando el total de la energía radiante incide, una fracción es absorbida por el cuerpo, a esto se le llama absorptividad, a la fracción reflejada se le conoce como reflectividad y la cantidad de energía restante que es transmitida se le llama transmisividad, estos valores al igual que la emisividad se encuentra en el rango de 0 a 1.

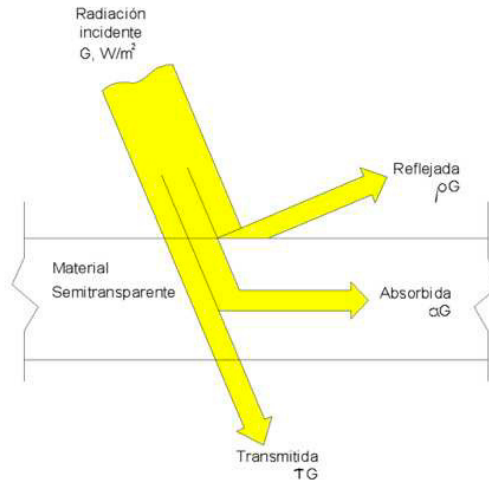


Figura 11. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación por un material semitransparente (Wu, 2015)

2.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

Las primeras investigaciones para determinar las propiedades térmicas que rigen el comportamiento de los materiales, fueron realizadas por el profesor en física A.P. Carman Y R.A. Nelson (1921), realizaron estudios que los condujeron a encontrar los valores de conductividad térmica y difusión en los materiales, específicamente en el concreto, con dichos estudios se concentraron en proveer información al Departamento de Ingeniería Experimental de la Universidad de Illinois, debido al incremento del uso del concreto como material para la construcción durante esa época.

T.D. Brown y M.Y Javaid (1970) dedicaron su investigación en la transferencia de calor del concreto fresco, específicamente en la obtención de propiedades térmicas como el contenido de humedad, calor específico, densidad, conductividad térmica y difusión térmica durante un periodo de que comprendía

desde las primeras 6 horas del curado del concreto hasta 7 días, con un enfoque mas orientado a la aplicación de estas propiedades.

En México se han investigado materiales artesanales para construcción, como los ladrillos de arcilla hechos en central Tabasco (Custodio-García, 2005), donde las temperaturas llegan a sobrepasar los 40 °C durante el verano, dichas piezas se convirtieron en una alternativa en costo para los constructores y en ahorro de energía para quien habite la estructura.

Algunos autores llevaron el estudio hacía la evaluación térmica de materiales específicos, presentando estudios experimentales de concretos aislantes (Tae,2013), concluyendo que los valores de las propiedades térmicas del concreto pueden ser reducidos a través de un incremento de los agregados ligeros, así como también con la implementación de burbujas de vidrio, las cuales interrumpen la transferencia de calor por medio de la baja conductividad.

2.4.1 Conductividad térmica

En la industria de la construcción se trabaja con materiales cerámicos como el concreto, morteros, pastas, etc.; estos materiales tienen excelentes propiedades mecánicas y constructivas, sin embargo presentan propiedades térmicas deficientes, las cuales dependen directamente de la constitución de sus agregados.

La conductividad térmica es una de las propiedades que gobierna la transferencia de calor, la cual permite transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas o sistemas, o lo que es lo mismo la capacidad de transferir calor. Este fenómeno se presenta con mayor intensidad en estados

sólidos de la materia, sin embargo también es posible que sea transferida por fluidos (Cengel, 2011).

El valor de la conductividad térmica de concreto se encuentra dentro del rango de 0.62 hasta 3.3 W/mK, dependiendo del tipo de agregado, contenido de humedad y la temperatura. Se han reportado valores de conductividad del concreto ligero entre 0.4 y 1.89 W/mK, además de otros valores reportados en la literatura, cuando los agregados del concreto son sustituidos por materiales aislantes como barras de poliestireno, fibra de vidrio y ceniza volante, dichos valores exhiben valores de 0.07 a 0.33 W/mK. (Tae, 2013).

Se han realizado diversos estudios térmicos para bloques y morteros y se ha reportado que las juntas de mortero presentan mayor influencia en la conducción del calor a través de los muros, reportando valores que van desde 0.3, 1.0 y 1.4 W/mK, de acuerdo a los estándares europeos (Khan, 2015), mientras que los bloques huecos elaborados de cemento arena, se encuentran con valores menores en comparación con los del concreto, esto debido a la porosidad que presentan las piezas, los valores rondan entre 0.69 a 1.10 W/mK (Sassine, 2017).

2.4.2 Calor específico

El calor específico es una propiedad de los materiales la cual se refiere a la cantidad de calor por unidad de masa de un sistema u objeto que se requiere para aumentar una unidad de temperatura.

Los elementos elaborados con base de cemento-arena, ya sea de mortero o concreto, tienen valores que fluctúan los 1000 J/kgK, mientras que las piezas de mampostería se encuentran entre los 700 a 800 J/kgK, esto se debe al contenido

de humedad que retienen los elementos, por ello, cuanto mas elevado es el valor de esta propiedad mas tiempo le tomará en incrementar su temperatura.

Algunos de estos valores pueden ser encontrados en la literatura actual, sin embargo, se especifican algunos valores en la norma EN1996-1-2, los cuales son dependientes de la temperatura (Eurocode, 2005).

2.4.3 Emisividad

Se le conoce como emisividad a la propiedad que determina la absorbanza de las superficies, a la superficie que emite la radiación se le conoce como cuerpo negro, este se define como un emisor y absorbedor perfecto de la radiación, es un hecho que ninguna superficie puede emitir mas energía que un cuerpo negro, debido a que este absorbe toda la radiación incidente. Descriptivamente el cuerpo negro es una idealización de la emisión uniforme (ver Figura 12a), sin embargo en la realidad este fenómeno se presenta de manera no uniforme (ver Figura 12b).

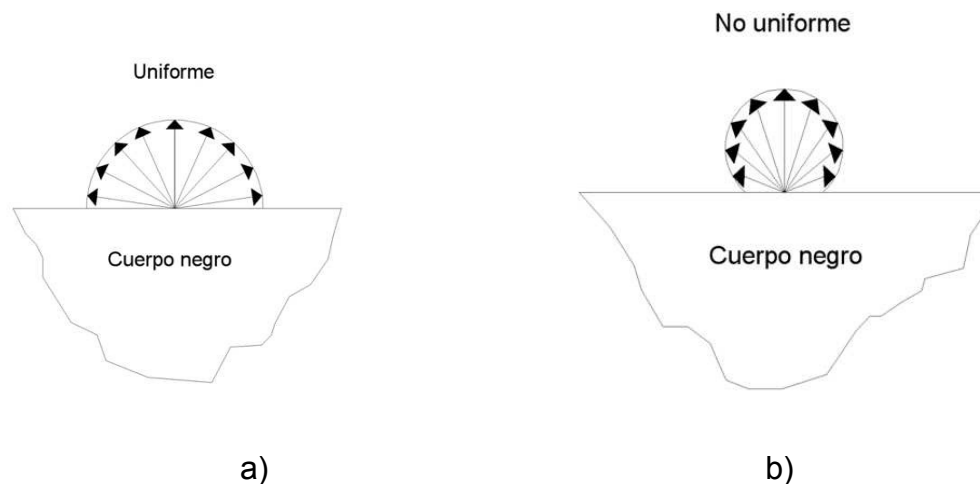


Figura 12. Diagrama de difusión de energía de radiación de un cuerpo negro a) Uniforme, b) No uniforme (Cengel, 2011)

2.4.4 Expansión y contracción térmica

Todos los materiales para la construcción padecen el fenómeno de dilatación y contracción cuando existe un aumento o descenso significativo en la temperatura, por ejemplo, al aplicar calor sobre una superficie o elemento, la velocidad y separación de sus partículas aumentará, caso contrario cuando un sistema pierde calor y su temperatura disminuye, sus partículas pierden velocidad y la distancia entre ellas se hace mas corta.

Este fenómeno es interesante para cualquier estructura, debido a que estas alteraciones pueden llegar a presentar esfuerzos adicionales y manifestarse como deformaciones térmicas (Nadjai, 2006).

Algunos estudios afirman que la expansión en elementos elaborados de Cemento Portland se debe principalmente a los agregados utilizados (Eurocode, 2004), en la Tabla 8 se muestran los coeficientes para piezas de mampostería y morteros ante temperaturas ambientales.

Tabla 8. Valores de expansión térmica de elementos de mampostería (Eurocode, 2005)

Material	Expansión Térmica ($\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$)
Concreto de agregado denso y piedra manufacturada	6 a 12
Concreto de agregado ligero	6 a 12
Mortero	10 a 13

2.4.5 Calor latente

Esta propiedad hace referencia a cuanta energía es necesaria para que un material o sustancia cambie de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).

Este fenómeno manifiesta al calor que al ser recibido por un cuerpo o

sistema, no incrementa su temperatura sino que únicamente produce el cambio de estado; existen algunos tipos de calor latente los cuales son:

- Vaporización: líquido a gas
- Fusión: sólido a líquido
- Solidificación: líquido a sólido
- Sublimación: sólido a gas
- Condensación: gas a líquido

Para la mayoría de los materiales de construcción se desconocen investigaciones sobre esta propiedad, debido a la dificultad para cambiar su estado con la aplicación de calor.

2.4.6 Propiedades adicionales

En el estudio de transferencia de calor, existen parámetros los cuales no gobiernan este fenómeno de la termodinámica, sin embargo, su presencia desempeña un papel que no se puede ignorar.

2.4.6.1 Densidad

La densidad, se refiere a la cantidad de masa en un determinado volumen o espacio, esta propiedad es una de las mas significativas para el desempeño térmico de los materiales, estudios demuestran que, cuanto mayor sea la densidad de un material este tenderá a conservar una mayor cantidad de energía, incluso algunos autores relacionan la asociación que tienen la conductividad térmica con la densidad de los materiales (Robati, 2016).

2.4.6.2 Porosidad

Se define como la cantidad o medida de espacios vacíos que tiene un material en un sólido (Aramide, 2012), es una fracción del volumen de los huecos sobre el volumen total, adquiere valores entre 0-100%.

Estos vacíos pueden estar o no conectados entre sí, de tal manera que un material puede presentar un buen desempeño térmico si estos poros no se encuentran conectados, debido a que pueden almacenar humedad y esta a su vez con el cambio de temperatura aumentará o disminuirá su temperatura, afectando la temperatura interior de la estructura.

Para conocer estos valores, se llevan a cabo ensayos a 28 días bajo la norma ASTM C-642 (2013), en la tabla 9 se muestran criterios para evaluar la porosidad accesible al agua:

Tabla 9. Porcentajes de porosidad accesible en el concreto

Porosidad accesible	Características del concreto
<10%	Buena calidad y compacidad
10-15%	Moderada calidad
>15%	Inadecuada calidad

Desafortunadamente para esta propiedad no es posible realizar un modelo computacional incluyéndola, por ello se toma como propiedad más cercana, el valor de la densidad del material (Kontoleon *et al*, 2013).

2.4.6.3 Contenido de humedad

El contenido de agua es una característica que influye en el comportamiento de la resistencia térmica de los materiales, las propiedades térmicas del concreto y la mampostería se ven afectadas por el contenido de agua y la porosidad

(Harmathy, 1970). Algunos escritores afirman que, esta propiedad junto con la densidad del material afectan directamente el valor de la conductividad térmica (U.S.NRC, 2010), además de alteraciones en los coeficientes de expansión térmica, antes de que la humedad cambie a estado gaseoso (Shin, 2002; Shoukry 2011).

2.5 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El uso del MEF, ha sido utilizado eficientemente para desarrollar modelos físicos y comparar resultados contra reportes experimentales, tomando el caso de cual se demostraba que las partículas mas largas implicaban menor resistencia térmica interfacial y una conductividad térmica efectiva mas alta, lo cual indicó que la conductividad térmica disminuía con el incremento de la porosidad del material (Qian, 2016).

Todos los fenómenos conocidos en la ingeniería son descritos por un lenguaje físico y matemático, problemas complejos como el comportamiento de estructuras, involucrando cambios de tiempo, posición, etc. son gobernados por una ecuación que relaciona una función conocida y una o mas de sus derivadas, Edwards (2001) puntualiza tres objetivos principales de una ecuación diferencial:

- 1) Determinar la ecuación diferencial que describa una situación física específica.
- 2) Determinar de manera exacta o aproximada la solución apropiada de su ecuación
- 3) Interpretar la solución que se encuentre

La solución de un problema, sin importar el método, sigue un camino particular (ver Figura 13), basado en la formulación de un problema físico del mundo real, se analiza y se soluciona mediante la técnica mas conveniente, dependiente del número de variables, tipo de análisis, medio analizado, etc., una vez analizado se buscan las incógnitas que llevaron al planteamiento del problema.



Figura 13. Proceso de la modelación matemática (Edwards, 2001)

Los modelos matemáticos conllevan también a una serie de ventajas y desventajas que hacen énfasis en la decisión de su uso, dentro de las principales ventajas de la resolución de un modelo matemático se encuentra (Edwards, 2001):

- Menor uso de recursos, tiempo y costo
- Identificación rápida de las expectativas esperadas
- Menor riesgo asociado a falla comunes durante el proceso de experimentación
- Identificación visual de cualquier punto de interés
- Permite obtener mayor numero de alternativas debido a la rapidez del proceso

Las desventajas asociadas a la aplicación de un modelo matemático son:

- Elemento intangibles que pudieran dar información importante
- Dificultad para modelación e ingreso de propiedades
- Sensibilidad de errores de medición
- Requiere alto grado de habilidad matemática para la modelación e interpretación

El tiempo maquina puede ser grande en caso de no contar con equipo necesario

2.6 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (MEF) se plantea como un procedimiento general de discretización de problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente (Zienkiewicz, 2000), se dice que uno de los primeros en utilizar el nombre de "elemento finito" fue Clough (Seagerlind, 1984), debido a que hacia uso de la metodología aplicada en sistemas discretos.

Esta técnica de solución numérica se basa en la discretización de un dominio en un numero finito de subdominios, dicho comportamiento de estos elementos mediante un numero finitos de parámetros, con la información necesaria se analiza y soluciona mediante el ensamblaje de los subdominios en sus fronteras compartidas (Rao, 2011).

El método de los elementos finitos se procesa como un algoritmo, mediante una serie de pasos es posible analizar diferentes tipos de problemas de desplazamientos, transferencia de calor, eléctricos, hidráulicos, flujos, etc.: a través del medio continuo, en cada uno de los elementos se asume que una función matemática simple puede representarlo, estas funciones reciben el nombre de funciones de interpolación y se definen en términos de las variables de campo y en los nodos como un conjunto de funciones de forma (Cavazos, 2016).

Las variables de campo, como las ecuaciones de energía para la transferencia de calor, los valores desconocidos adquirirán el valor nodal de la variable de campo, una vez resueltas estas ecuaciones, las funciones de

interpolación sustituirán a los resultados y así determinar el cambio de la variable de campo en cada uno de los elementos discretizados.

El procedimiento anterior se presenta explícitamente de la siguiente manera:

1. El medio continuo se discretiza en elementos finitos (subdominios)
2. Se selecciona la función de interpolación que se adapte al problema
3. Se construye la forma débil o residuo ponderado de la ecuación diferencial
4. Se supone la función aproximada sobre un elemento finito "Tipo"
5. Se derivan las ecuaciones del elemento finito mediante la sustitución de la solución aproximada en la forma débil o residuo ponderado en cada nodo
6. Se ensamblan las ecuaciones matriciales de los elementos finitos para obtener las ecuaciones generales de energía del sistema
7. Se indican las condiciones iniciales y de frontera para que el sistema pueda tener solución
8. Se resuelven las incógnitas
9. Se calculan las variables de campo en los elementos

Para la interpretación de los valores obtenidos, se debe considerar que la solución es aproximada y depende de la geometría y densidad de los elementos finitos, así como del número de nodos que se utilizan.

2.6.1 Discretización del dominio

Cada problema en particular está sujeto a un dominio en el espacio que se encuentra delimitado en sus tres direcciones, desde $X_1=0$ y $X_1=L$, $X_2=0$ y $X_2=L$, $X_3=0$ y $X_3=L$, $L \in (0,L)$, para la implementación de la técnica de los elementos finitos es necesario la división del dominio en elementos de menor dimensión, al conjunto

de estos elementos o subdominios se le conoce como “elementos finitos”, mientras que al proceso anterior se le llama mallado.

Los subdominios están delimitados por nodos, ya sea en sus vértices, en su frontera o en el interior del él, con el mallado es mas sencillo representar la solución que tendrá el dominio entero; estos nodos tienen la función de contener los grados de libertad necesarios según el tipo de análisis que sea realizado.

Cada subdominio se encuentra en la frontera con otro subdominio o condición de frontera, de manera que para la conexión entre elementos es necesario la imposición de continuidad entre los nodos, de tal manera que pueda converger el análisis. La función base que será utilizada para la solución del modelo computacional dependerá de la calidad de respuesta que se busca obtener, desde funciones base lineales hasta funciones polinómicas de enésimo orden, así mismo el numero de nodos por elemento desarrolla un papel clave en la aproximación del análisis.

La densidad del mallado, o sea el numero de elementos finitos sobre una área específica del dominio, dependerá fundamentalmente de la geometría del domino, el tipo de elementos y la exactitud deseada para la respuesta de salida, por lo tanto es necesario conocer las características de convergencia de cada tipo de elemento utilizado.

2.6.1.1 Tipos de elementos

La selección del tipo de elementos que se utilizaran en el análisis no es algo trivial, existen familias de elementos de distinta configuración geométrica y

diferente tipo de función base, el tipo de espacio en el que se desarrolla el modelo, ya sea unidimensional, en el plano o en el espacio.

Los elementos unidimensionales son conocidos como barras, donde los nodos se encuentran conectados entre sí (ver Figura X):

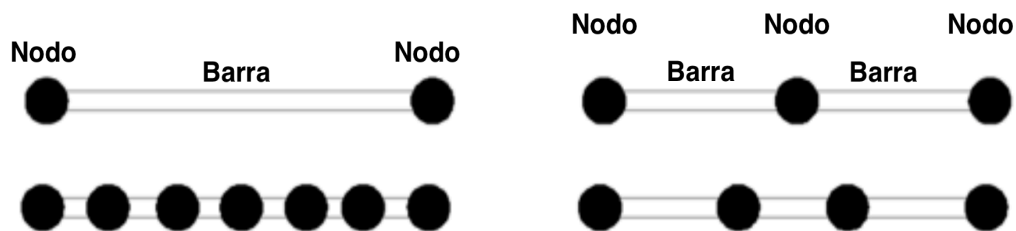


Figura 14. Elementos finitos unidimensionales tipo barra (Dessault Systemes, 2015)

Los elementos para problemas en el plano cuentan con una mayor diversidad, teniendo distintas opciones para el análisis, desde funciones base lineales hasta un conjunto de funciones base lagrangiano o serendípito (ver Figura 15a-15f), esto otorga funciones mas complejas y en consecuencia una mejor solución del comportamiento real del fenómeno (Segerlind, 1984).

Existen también otros elementos finitos que pueden ser utilizados, se debe tener especial cuidado en la configuración geométrica de estos elementos, cuidando que no existan elementos distorsionados, debido a que pueden provocar un error en la convergencia del análisis.

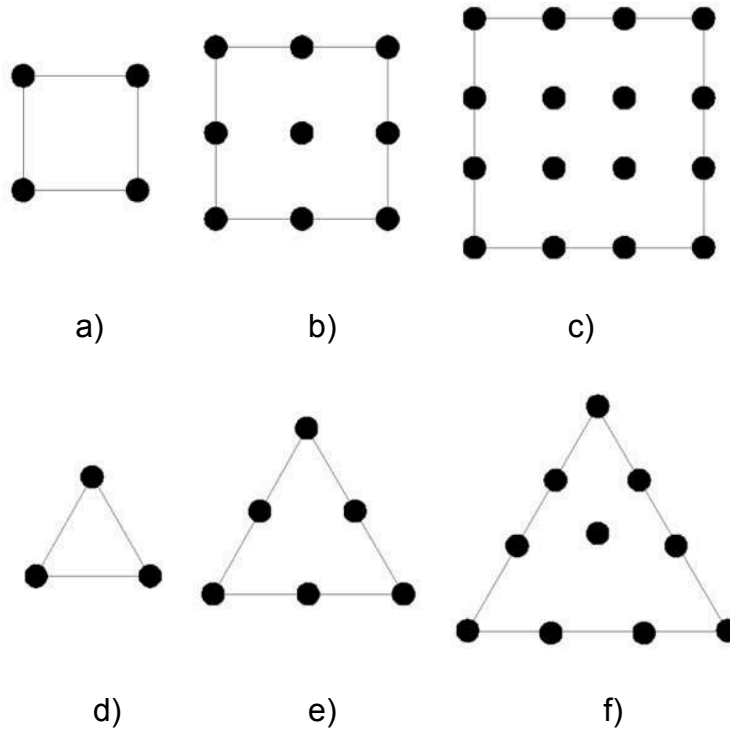


Figura 15. Elementos finitos bidimensionales a) cuadrilátero 4 nodos, b) cuadrilátero 9 nodos, c) cuadrilátero 12 nodos, d) triangular 3 nodos, e) triangular 6 nodos, f) triangular 10 nodos (Dessault Systemes, 2006)

El tipo de elemento seleccionado, dependerá del tipo de análisis que se desarrolle,, se permite el uso de distintos tipos simultáneamente, siempre que los nodos se encuentren ensamblados, de lo contrario existirá divergencia para la solución de la ecuaciones; En zonas de cambio de material o de concentración de esfuerzos así como regiones de interés el modelo se debe discretizar con un mallado mas fino. El software usado para el presente trabajo contiene una serie de diferentes elementos en la librería que pueden ser seleccionados (ver Figura 16):

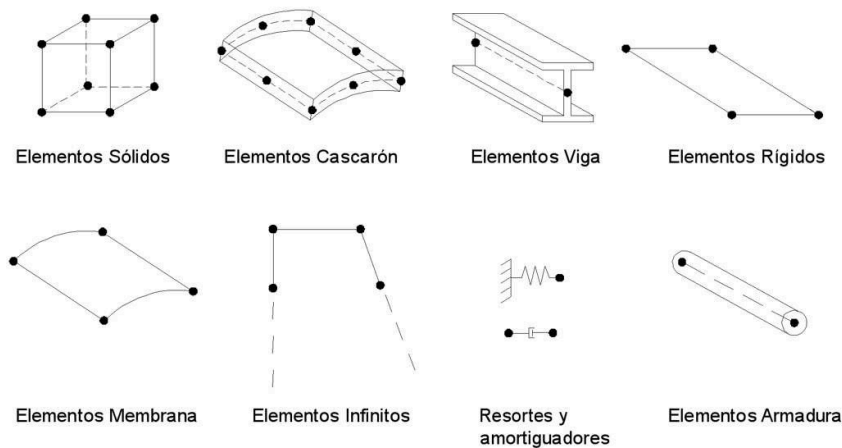


Figura 16. Familias de elementos finitos en Abaqus CAE (Dessault Systemes, 2015)

Al discretizar el dominio, es recomendable la revisión de los subdominios, evitando tener en el mallado elementos distorsionados, es decir con una relación de aspecto cercana a uno, si no existen cambios significativos de geometría o de material, utilizar subdominios con geometría similar (Dessault Systemes, 2015).

2.6.1.2 Modelos de interpolación

Las funciones de interpolación o de aproximación son las encargadas de aproximar como su nombre lo indica a la solución del problema, estas funciones por lo general se manifiestan en forma de polinomios de distinto grado (lineales, cuadráticas o cúbicas), el valor que cada nodo adquiere es igual al numero de grados libertad según el elemento previamente seleccionado, representando las incógnitas al formular el sistema de ecuaciones (Rao, 2011).

Para elementos en 3D, destacan los elementos isoparamétricos, los cuales emplean las mismas funciones de interpolación para definir la forma de lo

elementos y el cambio de la variable de campo dentro del elemento finito, para modelos 3D cuadráticos, la forma de las funciones de interpolación es(ver Ec. 11):

$$N(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 + \alpha_7 z^2 + \alpha_8 xy + \alpha_9 yz + \alpha_{10} zx \quad (11)$$

Donde α simboliza el coeficiente de polinomio

2.6.1.3 Derivación de las ecuaciones del elemento

La resolución de las ecuaciones gobernantes del sólido en estudio, conlleva a una serie de pasos:

- Construir la forma débil o residuo ponderado de la ecuación diferencial
- Suponer la forma de aproximación de un elemento finito
- Derivar las ecuaciones del elemento finito mediante la sustitución aproximada en la forma débil o residuo ponderado

Para la derivación de las relaciones algebraicas entre los valores en los nodos se puede aplicar cualquier método que cumpla con este proceso, como primer paso, se debe construir la forma débil, buscando la solución aproximada de cada uno de los elementos finitos, en este caso la función polinómica de aproximación para un elemento finito U^e se expresa por medio de la siguiente expresión:

$$U^e = \sum_{j=1}^n U_j^e \Psi_j^e(x) \quad (12)$$

Donde:

U^e : función polinómica de aproximación

U_j^e : valores de la solución del elemento finito en sus nodos

Ψ_j^e : funciones de aproximación del elemento

Los valores en la variable U^e son determinados de manera que se satisfaga

por completo la integral pesada de la ecuación.

Para determinar el número de relaciones algebraicas necesarias entre los valores de U^e se formula la forma pesada de la integral, es decir, cambiando la ecuación diferencial por la siguiente expresión:

$$-\frac{d}{dx}\left(a\frac{du}{dx}\right) + cu - q = 0 \text{ donde: } 0 < x < L$$

$$u(0) = u_0, \left(a\frac{du}{dx}\right)_{x=0} = Q_0 \quad (13)$$

Donde $a = a(x), c = c(x), q = q(x), u_0$ y Q_0 son datos conocidos del problema. En la ecuación (14), la forma pesada de la integral W representa la función de peso, simbolizando el dominio completo de un elemento finito. En resumen, para cada W se obtiene una ecuación que relaciona todos los U^e del elemento, otorgando el mismo número de ecuaciones independientes que se necesitan encontrar para los valores de U^e .

$$0 = \int_{XA}^{XB} W \left[-\frac{d}{dx}\left(a\frac{du}{dx}\right) + cu - q \right] dx \quad (14)$$

Con el fin de resolver el sistema de ecuaciones, se implementan las ideas de Galerkin (Salazar, 1999), escogiendo una función W que sea Ψ_j^e y se obtiene la i -ésima ecuación de las ecuaciones necesarias, debido a que contiene la segunda derivada de U^e además, es necesario aproximarse aun mas a la forma fuerte de la ecuación y suavizar la continuidad de las funciones Ψ_j^e . La forma integral resultante se le conocerá como forma débil de la ecuación, dicha forma contiene las condiciones de frontera del problema.

Se identifican las variables primarias y secundarias, estas son de la forma débil, con esto se necesita que las condiciones de frontera sean clasificadas, ya

sea por geometría o por fuerza (Salazar, 1999). Para encontrar la solución, la forma débil de la ecuación será igual a la ecuación diferencial y a las condiciones de frontera del elemento $u(x_a) = u_a$ y $u(x_b) = u_b$, por lo tanto, la aproximación de $u(x)$ debe ser un polinomio interpolante, o sea u_a en x_a y u_b en x_b , si la forma débil es capaz de derivarse en el primer orden de u significa que cualquier función continua es candidata para la solución del elemento finito.

Con la solución aproximada en forma de polinomios algebraicos, se comprueba que la interpolación del análisis numérico puede usarse para obtener las funciones de aproximación de un elemento. En resumen, para que el método continúe con el proceso del análisis, es necesario que la solución aproximada sea continua y diferenciable en todo el elemento, además que el polinomio se encuentre completo y sea un interpolante de las variables en los nodos del elemento finito, debido a que se necesitan satisfacer las condiciones de frontera.

2.7 ENSAMBLE DE MATRICES DE LOS ELEMENTOS

El proceso anterior es aplicable para un elemento finito tipo, representante de un subdominio del total, sin embargo, es necesario conectar el sistema de matrices de todo el mallado para darle la continuidad requerida.

Una vez que se ha obtenido la matriz local de cada elemento, por medio de una matriz de transformación se llega a la matriz global del sistema, la cual desarrolla la interacción entre los grados de libertad de cada elemento.

Esta matriz se caracteriza por contener la suma de los coeficientes y términos de los elementos finitos, la manera correcta de ensamblar esta matriz es

nombrando sus grados de libertad, es decir coincidiendo en los similares y superponiendo los elementos (Zienkiewicz, 2000).

2.8 CONDICIONES DE FRONTERA

En este tipo de análisis de transferencia de calor existen tres tipos de condiciones de frontera: una condición que puede ser inicial o de frontera (ver Figura 17) que es referida a la temperatura especificada en el dominio o en una región del mismo; La condición de flujo de calor especificado o de aislamiento y por ultimo la condición de convección en el dominio.

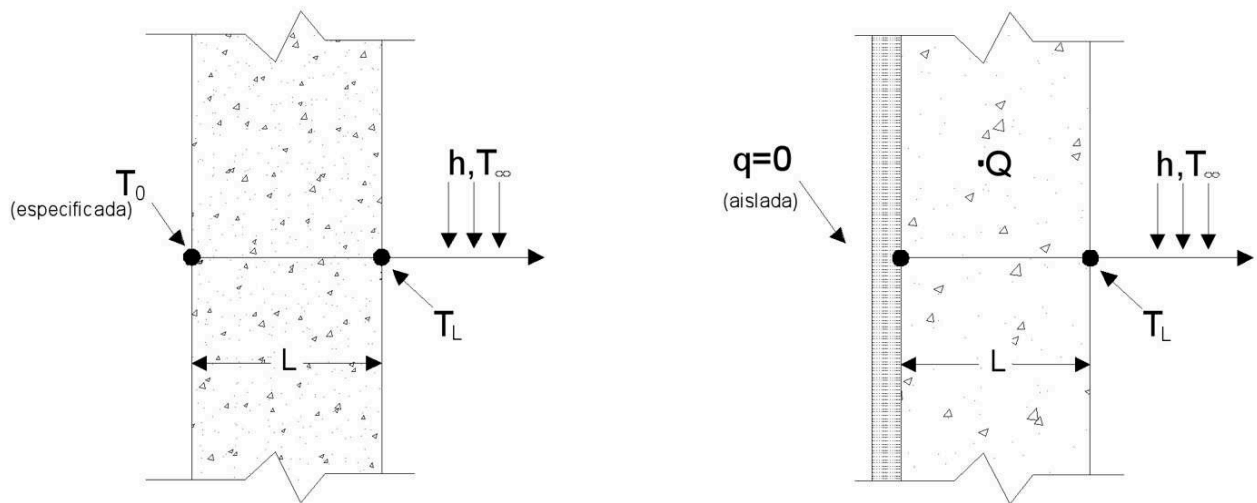


Figura 17. Ejemplos de condiciones de frontera en la transferencia de calor unidimensional (Chandrupatla, 1999)

La función principal de las condiciones de frontera es imponer una condición particular en el dominio, dicha condición es completamente necesaria para que el análisis se realice.

2.9 SOLUCIÓN DE ECUACIONES PARA LOS GRADOS DE LIBERTAD

El ultimo paso de la técnica los elementos finitos, es la solución del sistema de ecuaciones generado por el ensamble de las matrices, se determinan los valores de temperaturas, flujos, desplazamiento, velocidad, esfuerzos, etc. según sea el caso mediante métodos directos como Cholesky, eliminación de Gauss o métodos iterativos mediante aproximaciones sucesivas a la solución real (Método de Jacobi, Gauss-Seidel, Newton, SOR, entre algunos otros) (Chandrupatla, 1999).

2.10 ESTUDIOS BASADOS CON MODELOS MATEMÁTICOS

El análisis del desempeño térmico en piezas y en estructuras de mampostería, ha sido estudiado por distintos autores en los últimos años, con el objetivo de preservar la capacidad térmica, estos estudios evalúan la respuesta ante cargas térmicas producidas por la temperatura del ambiente y/u otras fuentes externas de calor

De los primeros investigadores en estudiar el comportamiento térmico de piezas solidas y huecas para la construcción se encuentran Lorente *et al.* (1996), quienes propusieron un modelo simplista de transferencia de calor en dos dimensiones a través de una pieza hueca de terracota posicionada verticalmente, de tal manera que fue posible calcular la resistencia térmica y el flujo de calor bajo condiciones de un estado estacionario con una buena aproximación comparada con estudios experimentales anteriores. Años mas adelante y como continuación del trabajo anterior, Lorente *et al.* (1998) utilizando un software propio,

determinaron la resistencia térmica de muros con bloques de terracota, en dos configuraciones diferentes, ambos especímenes fueron probados bajo distintas condiciones de temperatura para conocer la respuesta del comportamiento térmico de las piezas.

H. Asan y Y. Sancaktar (1998) estudiaron los efectos de las propiedades termo-físicas y espesores de los muros con retraso de tiempo y factor de decremento, utilizando el esquema de Cranck-Nicolson, logrando resolver la ecuación de conducción de calor unidimensional, los autores encontraron que existe una alta influencia de estas propiedades en el factor de decremento y el retraso de tiempo. Lacarrière *et al.* (2003), investigaron el flujo y transferencia de calor de piezas perforadas verticalmente para demostrar que presentaban un mejor comportamiento mecánico que las perforaciones horizontales, asentadas en juntas de mortero de ancho variable y bandas de aire, buscando en una primera instancia limitar la transferencia de calor a través de los muros y luego verificar el mejor y mas optimo modelo de ensamblaje de las piezas.

Al-Hadhrani *et al.* (2009) evaluaron la resistencia térmica de 9 bloques de arcilla y 2 de concreto, incluyendo piezas normales, aligeradas y con aplicación de material aislante, concluyendo que al utilizar materiales ligeros y al adicionar materiales aislantes en los huecos de los bloques se mejoró el desempeño térmico significativamente, también demostraron a través de un análisis económico que las piezas de arcilla en adición con material aislante resultan ser mas efectivas en comparación con los otros especímenes.

Otros modelos numéricos de transferencia de calor en bloques fueron desarrollados por Antar *et al.* (2009) quienes consideraron la convección natural

en el interior de las cavidades y la conducción a través del material en el plano bi-dimensional, los autores reportaron un incremento porcentual de la resistencia térmica al aumentar el numero de cavidades en los bloques.

En México, Borbón *et al.* (2010) a través de métodos numéricos obtuvieron la resistencia térmica de muros fabricados con bloques huecos de concreto de dos celdas con dimensiones 0.40 x 0.20 x 0.15 m, desarrollando un modelo unidimensional y utilizando temperaturas medidas en dos días, los cuales simulaban las condiciones extremas de la ciudad, fue posible determinar la cantidad de calor que podían disipar estas piezas, concluyendo que la radiación es el mecanismo que mayor flujo de calor aporta a la transferencia de calor. Un año después Pérez *et al.* (2011) realizaron un estudio numérico mediante el método de las diferencia finitas en los muros elaborados con bloques de concreto con cavidades, buscando conocer la resistencia térmica al ser incluido un aislante de temperatura en la superficie exterior y en sus cavidades, observando un incremento lineal de la resistencia en función del espesor del aislante.

Kontoleon *et al.* (2013) presentaron un estudio detallado de la influencia de la densidad del concreto y las variaciones de la conductividad en seis diferentes combinaciones de muros, ensamblados en capas de concreto, recubrimientos y aislantes térmicos, resueltos a través de la formulación matemática de transferencia de calor en sólidos. Recientemente Lili Zhang *et al.* (2017) analizaron la respuesta de 4 muros fabricados con capas de aislante térmico con distinta posición, para conocer la diferencia de conservación de energía cuando el aire acondicionado se encuentra en operación continua e intermitente. Se comparó la tasa de respuesta térmica en los muros mediante gráficas de tiempo contra flujo de calor.

En Cuernavaca, Morelos Xamán *et al* (2017) investigaron el desempeño térmico de muros y losas, estudiando durante un periodo de 24 horas el comportamiento de bloques de dos y tres celdas, con y sin la aplicación de aislante térmico en el día mas caliente y el mas frío del año, además de analizar distintas configuraciones de losas con estos especímenes. Dentro de los resultados mas sobresalientes reportan que sin la aplicación de material aislante y recubrimiento en losas, se registra un incremento del 32.4 al 46.3% de la carga térmica.

2.11 ESTUDIOS BASADOS CON MODELOS COMPUTACIONALES

Del Coz Díaz *et al.* (2006), realizaron un análisis no-lineal de transferencia de calor aplicando el método del elemento finito a piezas huecas de concreto ligero, evaluando con diferentes valores de conductividad térmica en bloques y morteros; los resultados obtenidos a través de lo experimental y lo numérico son altamente aceptables. Posteriormente el mismo grupo de investigadores, utilizaron estos resultados para realizar un análisis no-lineal de transferencia de calor a 5 piezas de concreto ligero con diferentes configuraciones geométricas, concluyendo que la confiabilidad en el uso del elemento finito permite reproducir con alta aproximación este tipo de mecanismos.

Uno de los sitios con mayor nivel de variación de temperatura diurna-nocturna es Arabia Saudita, donde se condujo un estudio de transferencia de calor realizado por Al-Hazmy *et al.* (2006) con las piezas de construcción mas comunes, mediante 3 diferentes configuraciones, incluyendo piezas rellenas con aire y con

material aislante, obteniendo una reducción máxima de calor del 36% al emplear barras de poliestireno en sus cavidades. Mahmoud (2012), desarrolló un modelo computacional para estudiar el desempeño térmico de bloques de concreto celular (AAC) aplicado en muros bajo condiciones de verano, para determinar el tamaño y distribución de las cavidades propuestas, concluyendo que las cavidades largas reducían en un 50% en flujo de calor.

Un análisis térmico para piezas de mampostería perforadas y rellenas con material de baja conductividad térmica fue realizado por Bassiouny *et al.* (2016), mediante el método del volumen finito resolvieron a través de un modelo la transferencia de calor en el estado estacionario, se concluyó que llenar con poliuretano las cavidades de los bloques incrementa la resistencia térmica (Valor R), provocando una reducción de aproximada de 30% en la transferencia de calor a través de los muros de 3.00 x 3.00 m.

Illampas *et al.* (2017) evaluaron el potencial térmico y el desempeño estructura ambiental de sistemas de mampostería, usando diferentes tipos de piezas, mismas que utilizaban materiales aislantes como poliuretano, poliestireno, roca, corcho y una cavidad vacía. Se evaluó el coeficiente de transferencia de calor (Valor U) mediante un análisis de elementos finitos desarrollado en el software conocido como Abaqus/CAE, los autores compararon los resultados de las piezas rellenas de material aislante contra las normas de eficiencia energética de su país. En ese mismo año, Alghamdi *et al.* (2017) estudiaron la eficiencia del mortero como aislante térmico, utilizando piezas con cavidades cortas y largas, además, muros sencillos de mampostería y muros dobles, a través de modelos de elementos finitos en el software comercial Abaqus CAE, a partir del análisis

térmico, realizaron un análisis económico para determinar la opción óptima financiera. Obteniendo como conclusiones mas relevantes la aceptación de la aproximación del modelo a través del MEF, la alta influencia del tipo de mortero y un 39% de reducción de flujo de calor cuando se implementa un espacio vacío de 3.00 cm, en comparación que los muros sencillos.

Kanellopoulos *et al.* (2017) realizaron un análisis numérico junto con un modelado de transferencia de calor a través de bloques perforados de arcilla, estudiando su comportamiento térmico bajo los efectos de los 3 mecanismos de transferencia simultáneamente, se analizó la respuesta térmica de los muros de mampostería cuando son sometidos a la carga dinámica del flujo de calor, de este trabajo se resalta el bajo efecto de la convección en los huecos con respecto a la radiación y la influencia de los requerimientos de energía en los edificios en los últimos días.

2.12 REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVAS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN ESTRUCTURAS

El Reglamento para las Construcciones del Municipio de Monterrey, Nuevo León, en el artículo 100 (RCMM, 2015), se define que toda estructura deberá tomar en cuenta el efecto de las cargas muertas, cargas vivas, vibración y efectos del viento, además de tomar en cuenta las acciones secundarias como los cambios de temperatura, sin embargo no hace mención sobre considerar esta acción para el diseño de estructuras.

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de

Estructuras de Mampostería, especifican un análisis por temperatura en el capítulo 3.2.4 (GOCM, 2017), para el caso cuando exista un diferencial de temperatura o la estructura tenga una longitud mayor a 30.00 m, deberán considerarse los efectos de temperaturas en las deformaciones y elementos mecánicos.

Ambos casos, se encuentran asociados a la búsqueda del estado de esfuerzos y comportamiento mecánico de la estructura, ignorando las características térmicas de los elementos de construcción, los cuales aportan un mejor desempeño térmico a la estructura.

Por otra parte, en México, existen normas que regulan las especificaciones, tal es el caso de la NMX-C-460-ONNCCE (ONNCCE, 2019), esta norma no obligatoria establece un valor para la resistencia térmica (valor R), aplicada en las envolventes de las viviendas, de tal manera que sea posible reducir la demanda del uso de sistemas mecánicos de climatización, de acuerdo a la zona que sea ubicado el estado, ubicando a Nuevo León y a la mayor parte de la zona norte del país en la zona térmica 1 y 2.

Además, esta norma considera que las azotas deben tener un valor de R mínima de $1.4 \text{ m}^2\text{K/W}$ y los muros un valor mínimo de $1.0 \text{ m}^2\text{K/W}$, ambos sin la inclusión de puentes térmicos, es decir, el material debe ser continuo en toda el área de la superficie.

Existe una familia de normas oficiales que deben ser cumplidas en los materiales y procesos para conseguir la eficiencia energética en las edificaciones (ver Tabla 10):

Tabla 10. Normas Oficiales de eficiencia energética

Norma	Descripción	Referencia
NOM-008-ENER	Eficiencia energética en edificaciones, envolvente e edificios no residenciales	(CONUEE, 2001)
NOM-018-ENER	Aislantes térmicos para edificaciones, características, límites y métodos de prueba	(CONUEE, 2011)
NOM-020-ENER	Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional	(CONUEE, 2011)
NOM.024-ENER:	Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidrios para edificaciones, etiquetado y métodos de prueba	(CONUEE, 2012)

El propósito del grupo de normas es optimizar el comportamiento térmico de la edificación, con el fin de disminuir la climatización por medios mecánicos y en consecuencia del ahorro de energía.

Alrededor del mundo, también existen normas que regulan los valores de las propiedades en los materiales de construcción, tal es el caso de la UNE-EN ISO 6946 (UNE, 2015), la cual normaliza los métodos de cálculo para los componentes y elementos para la edificación, resistencia térmica y transmitancia térmica, excluyendo los elementos de apertura (puertas, ventanas y/o elementos de cristal).

Esta norma internacional, es aplicable a elementos que están conformados por capas homogéneas, los métodos de cálculo pueden incluir cámaras de aire, debido a que es un sistema de construcción utilizado para el aumento de la resistencia térmica, de igual manera la norma tiene un apartado para capas heterogéneas.

Las normas de consulta que aplica esta norma son (ver Tabla 11):

Tabla 11. Normas internacionales aplicadas a ISO-6946 (UNE, 2015)

Norma	Descripción
ISO 7345	Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones
ISO 10456	Materiales y producto para la edificación. Procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño.
ISO 13789	Prestaciones térmicas de los edificios. Coeficientes de transferencia de calor por transmisión y ventilación. Método de cálculo.

El confort térmico es un término subjetivo, sin embargo, tanto en México como en el mundo, se encuentran normados los estándares de confort térmico para interior de las edificaciones, donde se busca la conservación de un espacio térmicamente cómodo para quien o quienes residen en él.

Basado en el modelo del voto medio previsto (PMV) de Fanger (1973), donde se intenta alcanzar el equilibrio térmico, se establecieron normas internacionales, tales como la ISO 7730 (2005), ASHRAE Standard 55 (2013), EN 15251 (2007) y RITE, con el fin de especificar que condiciones deben cumplir los interiores de una edificación para obtener condiciones de confort.

Si bien, las estructuras tienen la meta principal de estudio la resistencia y la combinación de acciones, se debe considerar que no son los únicos factores de estudio. En México, basados en la norma internacional ISO 7730, un grupo de especialistas trabajó en el proyecto de la Norma Mexicana PROY-NMX-C-7730-ONNCCE-2017 “Industria de la construcción” - ergonomía del ambiente térmico con el fin de determinar de manera analítica e interpretar del confort térmico mediante cálculos, la cual fue puesta a consulta en el Diario Oficial de la Federación (DOF), logrando su publicación oficial en el año 2018.

Según la norma ISO, un ambiente confortable para temporadas invernales esta definido entre los 20 a 24 °C, con velocidad de aire menor a 0.15 m/s, humedad relativa del 50 % y la resistencia térmica de la vestimenta de 1 clo, mientras que para el verano la temperatura se establece entre los 23 a 26 °C, velocidad del aire menor a 0.25 m/s, humedad relativa del 50 % y 0.5 clo de resistencia térmica de la vestimenta.

El método de análisis para la Norma Mexicana representa un modelo estático, al igual que el RITE, a diferencia de los métodos propuestos por ASHRAE 55 y EN UNE 15251 que permiten y regulan la utilización de estándar adaptativo.

Estos métodos presentan diferencias entre si, principalmente tienen valores límite diferentes para cada caso o lugar de estudio, ya que dependen de la temperatura exterior propia del lugar, cuando es definido el lugar y el clima, el siguiente paso es obtener los límites del confort para cada estándar.

Con base en lo anterior, se resume en la tabla 12 las principales características de cada uno de las normas a nivel global, presentando importantes variaciones en sus valores de confort puesto que la situación geográfica para cada estándar surge de diferentes consideraciones

Tabla 12. Resumen de estándares establecidos según normas internacionales y locales para confort térmico (Bustillos, 2017)

Norma	Región	Categoría	Valores
PPD-PMV ISO 7730	Internacional	20% PPD	Invierno T=22°C. (+/- 3.5°C). Verano T=24°C. (+/-3.5°C).
		10%PPD	Invierno T=22°C. (+/- 2.5°C). Verano T=24°C. (+/-2.5°C).
ASHRAE 55	Estados Unidos (América)	20% PPD	Invierno T=22°C. (+/- 3.5°C). Verano T=17.8°C+0.31°C. (+/-3.5°C).
		10% PPD	Invierno T=22°C. (+/- 2.5°C). Verano T=17.8°C+0.31°C. (+/-2.5°C).
EN 15251	Europa	20% PPD	T=18.8°C+0.33°C.(+/-3.0°C).
		10% PPD	T=18.8°C+0.33°C.(+/-2.0°C).
RITE, 2007	España	Estándar	Invierno: T _{min} =20°C - T _{max} =23°C/Verano: T _{min} =23°C - T _{max} =25°C.
NEC-11, 2011	Ecuador	Estándar	T _{min} =18°C/T _{max} =26°C.
EN ISO 7730, 2006	Internacional	Estándar	Velocidad del aire 0 a 1 m/s, Humedad relativa (HR) 30 a 70%
RITE,2007	España	Verano	Velocidad media del aire 0.18 a 0.24 m/s, HR 40 a 60%.
		Invierno	Velocidad media del aire 0.15 a 0.20 m/s, HR 40 a 50%.
NEC-11, 2011	Ecuador	Estándar	Velocidad del aire 0.05 a 0.15 m/s, HR 40 a 65%.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL MODELO

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es la difusión de cada paso del modelo desarrollado que conllevó este trabajo de investigación, desde la etapa de experimentación o toma de datos en campo, hasta la obtención del modelo computacional simulando el fenómeno de transferencia de calor a través de los tres mecanismos para evaluar el comportamiento de una estructura de mampostería sometida a la acción de cargas térmicas provocadas por las condiciones extremas de la zona norte del país.

Se describe el equipo, material utilizado para la lectura de datos, y la estructura en estudio, evaluada en los días con la temperatura mas alta y la mas baja registrada durante Agosto 2017 a Agosto 2019

Además, se presentan los parámetros utilizados en el análisis de transferencia de calor para la modelación de la estructura obtenidos a través de estudios paramétricos con el software Abaqus CAE.

3.2 SOFTWARE COMPUTACIONAL

El modelo computacional de la estructura fue desarrollado por el paquete comercial conocido como Abaqus CAE 6.14, este programa proporciona una interface con la capacidad de crear, monitorear y evaluar las simulaciones de Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit (Dessault Systemes, 2015).

Abaqus, en su interface “Standard” resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales que gobiernan análisis estáticos, dinámicos, de transferencia de calor, eléctricos, fluidos y una variedad de problemas mas, teniendo el control del tiempo automático o directo del análisis en modelos lineales y no lineales, por otra parte, la interface de Abaqus “Explicit” tienen la capacidad de resolver sistemas de ecuaciones de análisis dinámicos, transitorios y no lineales de cuerpos sólidos mediante la integración de tiempo explícito (Dessault Systemes, 2015).

3.3 FASES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El modelo que se emplea en este trabajo de investigación es del tipo de transferencia de calor en el estado estacionario, es decir, sus propiedades no tienen variación en el tiempo, se evalúa el flujo de calor y la magnitud de la temperatura en las superficies.

La documentación de este software computacional define este tipo de análisis como no acoplado y de manera individual o en combinación con los mecanismos de transferencia que involucran la conducción, convección y radiación, refiriéndose a que la carga térmica recibida por la estructura no genera campos de esfuerzos, deformaciones ni desplazamiento, por lo tanto el modelo a resolver se define por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (15)$$

Donde:

a : difusividad térmica del material

t : variable temporal

T = variable de temperatura

x, y, z : variables en el espacio

Esta, es una ecuación diferencial (Ec. 15) en derivadas parciales parabólicas que describe la distribución del calor o variaciones de temperatura en el dominio a lo largo del transcurso de tiempo, el software conocido como Abaqus CAE, resuelve los modelos matemáticos de transferencia por conducción, convección y radiación de calor.

El análisis de transferencia de calor desacoplado, tiene el objetivo de modelar la distribución de calor por cuerpos sólidos, donde su conductividad térmica depende de la temperatura, energía interna y condiciones de frontera de convección y radiación, este modelo es definido por:

$$\int_V \rho \bar{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV \quad (16)$$

Donde: V es el volumen del material sólido, S representa el área superficial del sistema, ρ es la densidad del material, \bar{U} es la razón de tiempo de la energía interna, r es el calor suministrado al cuerpo por unidad de volumen y q representa el flujo de calor por unidad de área del cuerpo.

Para que un problema se encuentre desacoplado de un problema mecánico, es necesario definir la relación constitutiva, esta relación se encuentra definida por térmicos de calor específico (ρC_p), debido a que la variable $U = U(\theta)$, siendo θ la

temperatura del material, en este caso se asume una descripción lagrangiana, haciendo un seguimiento de las partículas materiales, donde el volumen y superficie significan la configuración de referencia (Covarrubias, 2018), esta expresión está definida por:

$$C(\theta) = \frac{dU}{d\theta} \quad (17)$$

Se asume que la conducción del calor por el medio continuo esta gobernada por la Ley de Fourier, debido a que el comportamiento de los materiales tiende a un comportamiento anisotrópico, es necesario definir k como una matriz, la cual representa los valores de conducción térmica en sus componentes, en la siguiente expresión se define la cantidad de calor por este mecanismo:

$$f' = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (18)$$

Donde, f' representa la magnitud del flujo de calor, con $q = q(x, t)$ por área y $q = r(x, t)$ por volumen, θ la temperatura del medio, especificando las condiciones de frontera $\theta = \theta(x, t)$ y x la posición.

Para que el modelo de transferencia de calor pueda converger, se realiza un ajuste variacional entre el balance de energía (16) y la ley de Fourier (Ec. 18), obteniendo un enfoque estándar propuesto por las ideas de Galerkin, el cual es expresado por:

$$\int_V \rho \bar{U} \delta \theta dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial x} k \frac{\partial \theta}{\partial x} dV = \int_V \delta \theta q dV + \int_{S_q} \delta \theta q dS \quad (19)$$

Donde $\delta \theta$ representa un campo variacional arbitrario donde se satisfacen las condiciones esenciales de frontera, al ser aplicada la interpolación a la temperatura sobre el dominio mallado por elementos finitos, se obtiene la descripción del continuo del tiempo de la aproximación geométrica, expresada por:

$$\int_V \rho \bar{U} N^N dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} k \frac{\partial \theta}{\partial x} dV = \int_V N^N q dV + \int_{Sq} N^N q dS \quad (20)$$

Donde los polinomios de primero y segundo grado en una, dos y tres dimensiones son expresados por la variable N^N , además, esta variable es aplicada en el modelo matemático de la convección y difusión de calor gobernado por la ley de enfriamiento de Newton, establecido por:

$$\int_V \delta \theta [\rho C_p \{ \frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} \} - \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial \theta}{\partial x}) - q] = - \int_{Sq} \delta \theta [nk \frac{\partial \theta}{\partial x} - q_s] dS \quad (21)$$

3.4 RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPO

La fase de recopilación de la información para alimentar el modelo computacional se encuentra dividida en etapas, siendo estudiados los días con las temperaturas mas altas del verano y las mas bajas del invierno. Basado en estudios previos (Martínez-Austria, 2016), las temperaturas mas altas en el norte de país se han registrado durante los meses de junio hasta agosto, mientras que las temperaturas mas bajas han sido registradas en el periodo de diciembre a febrero, esta información recabada desde 1960 hasta el año 2010 otorgó datos suficientes para la elección de las fechas para la toma de temperaturas en la estructura de estudio.

Los días seleccionados para la lectura de datos fueron 08 de junio del año 2019 y el 30 de enero del 2019, antes del registro de la temperatura, se mantuvo la consulta del pronóstico de temperaturas semanal, para evitar toma de datos en los días con pronóstico de lluvia, debido a que la humedad en el ambiente altera la temperatura y la sensación térmica.

3.4.1 Equipamiento utilizado

Para la medición de las temperaturas en los distintos puntos de la estructura fue utilizado un adquisidor de datos National Instruments modelo PXIe-1065 (ver Figura 18), con disponibilidad para 5 terminales, la terminal utilizada para el procesamiento de las temperaturas fue el modelo TB-4353 (ver Figura 19) de National Instruments con capacidad para 32 canales, los termopares utilizados fueron del tipo “J” (hierro/constantán) con recubrimiento de fibra de vidrio para la exposición ante la intemperie (ver Figura 20), la elección del tipo del termopar fue basada en el rango de temperaturas a las cuales sería sometido el instrumento, el termopar tipo “J” puede ser utilizado en temperaturas del orden de 0 a 750 °C, ya que el rango de temperaturas en esta investigación se estableció entre los -10 a 60 °C.

Para la calibración de los termopares, las temperaturas eran monitoreadas a través de una interface gráfica en el software usado Labview (National Instruments, 2016), las cuales también fueron evaluadas con termómetros de mercurio y un termómetro digital láser modelo 790066M Mastergrip para temperaturas del orden de -28 a 482 °C (ver Figura 21).

El equipo fue trasladado e instalado en el interior de la estructura en estudio, se mantuvo encendido y en correcto funcionamiento durante el desarrollo del análisis.

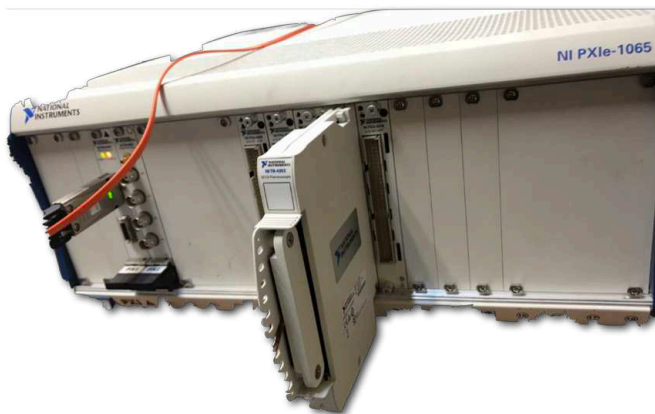


Figura 18. Adquisidor de datos (Datalogger) N.I. PXIe-1065



Figura 19. Terminal N.I. PXIe-4353



Figura 20. Termopar tipo "J"



Figura 21. Termómetro digital laser 790066M

3.4.2 Estructura en estudio

Para la lectura de datos se seleccionó una estructura de mampostería con características similares a construcciones típicas de mampostería de la zona, ubicada en el campus del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL (ver Figura 22), la cual fue fabricada con elementos estructurales de concreto reforzado y bloques de cemento-arena, debido a que este tipo de elementos son los mas comercializados en el país (Xamán, 2017).

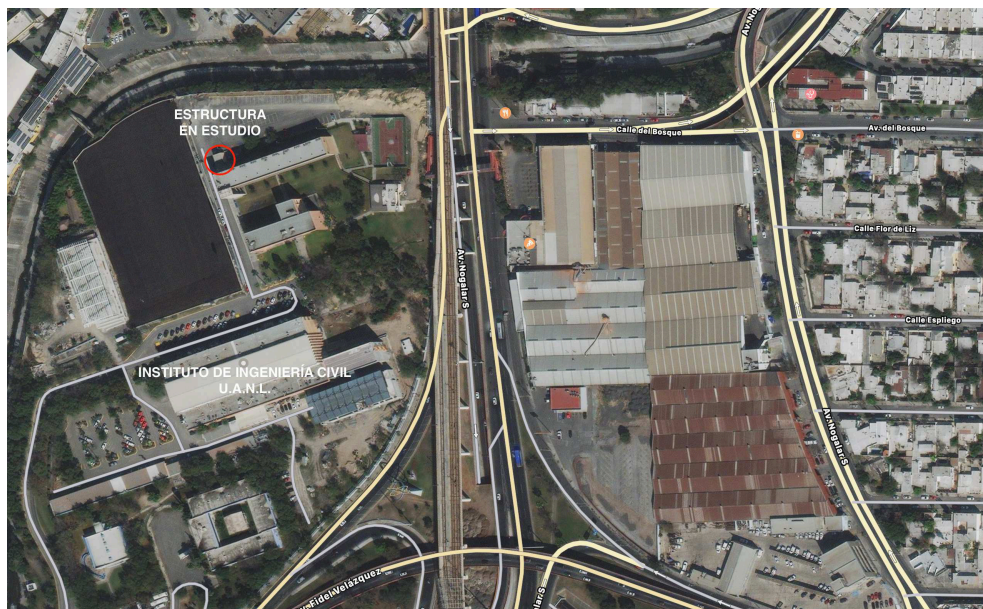


Figura 22. Localización de la estructura prototipo de estudio

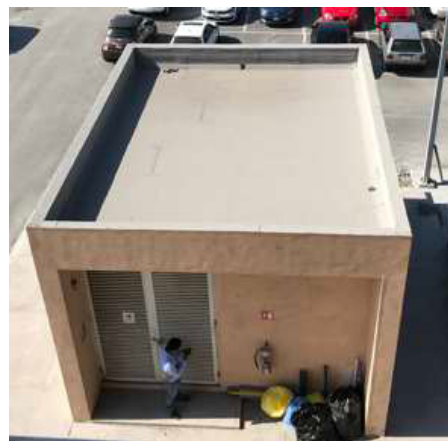
La estructura cuenta con un solo nivel, vista en planta, sus dimensiones son de 6.33 m en la base y 5.40 m de longitud, cuenta con una losa de concreto reforzado $f'c=250\text{kg/cm}^2$ de 0.15 m, altura total de 2.90 m desde el nivel de piso terminado hasta el paño interior de la losa, columnas de 0.33 x 0.33 m, muros elaborados de bloques huecos de concreto con 3 celdas (0.40 x 0.15 x 0.20 m),

asentados con mortero cemento-arena con dosificación de 1 (cemento hidráulico), $\frac{1}{4}$ (cal hidratada) y 3 (arena), mediante juntas de 0.01 m en el sentido vertical y horizontal y 0.03 m de espesor hacia el interior de la pieza; en el exterior cuenta con recubrimiento de mortero con dosificación similar y en su interior, recubrimiento elaborado de yeso, ambos acabados de 0.015 m según los planos facilitados por el personal del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil.

La estructura en estudio (ver Figura 23a y 23b)se encuentra con orientación de $11^{\circ}43' 26''$ hacia el Noroeste (sistema cartesiano), con una elevación de sol aproximada de -47.7° y un azimut de 55.03° tomando como referencia la latitud 25.7071° y longitud 100.275° , por lo que la estructura recibe la radiación solar con cierto grado de inclinación.



a) Vista frontal



b) Vista aérea

Figura 23. Estructura prototipo de estudio ubicada en el Campus del Instituto de Ingeniería Civil UANL

3.4.3 Lectura de datos

Se colocaron termopares en 10 puntos previamente seleccionados en la estructura para medir las temperaturas ambientales y superficiales de la estructura. Los sensores conocidos como termopares fueron colocados según la metodología aplicada por Zhang (2017) para la medición de temperaturas en muros a través de termopares como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Aplicación de termopares en muros exteriores

En la Figura 25 y 26 se aprecia esquemáticamente la ubicación de los termopares en la estructura; Se indica con T_{ext} a la temperatura de la superficie exterior, T_{int} a las temperaturas superficiales interiores y T_{amb} para temperaturas ambientales interior y exterior de la estructura en estudio, así como la distancia de su localización (ver Figura 27).

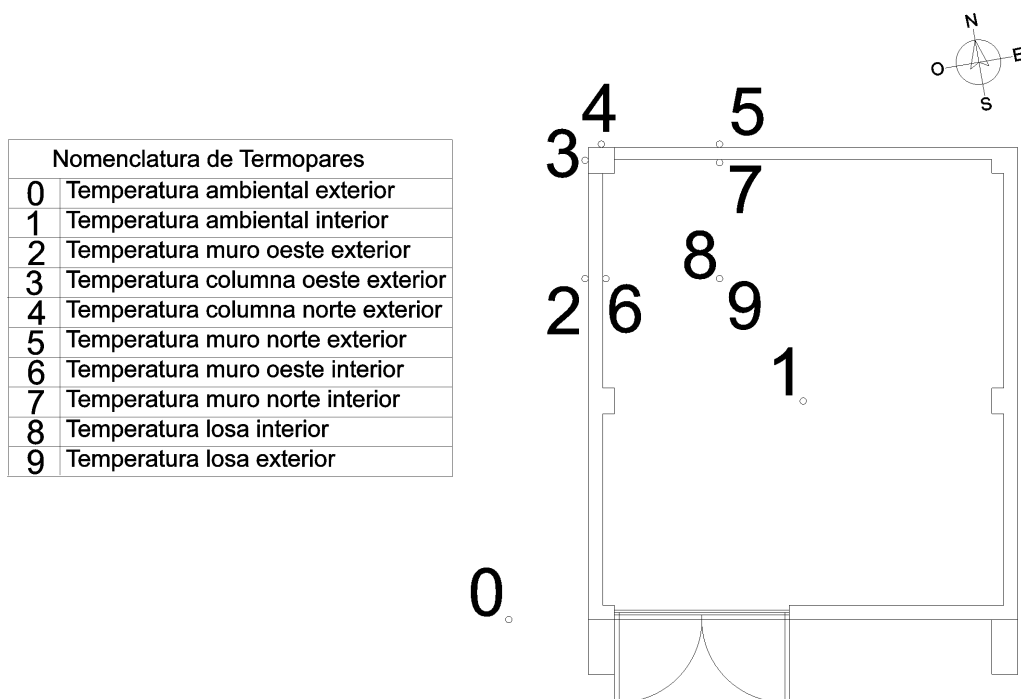


Figura 25. Esquema de localización de los termopares en la estructura (vista en planta)

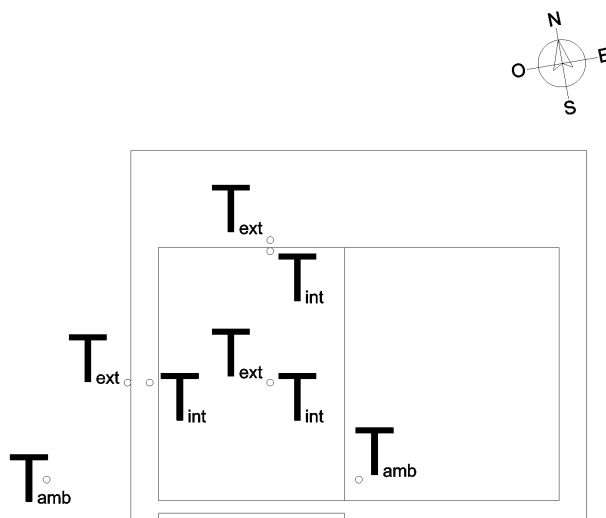


Figura 26. Diagrama de localización de termopares en la estructura (vista en elevación)

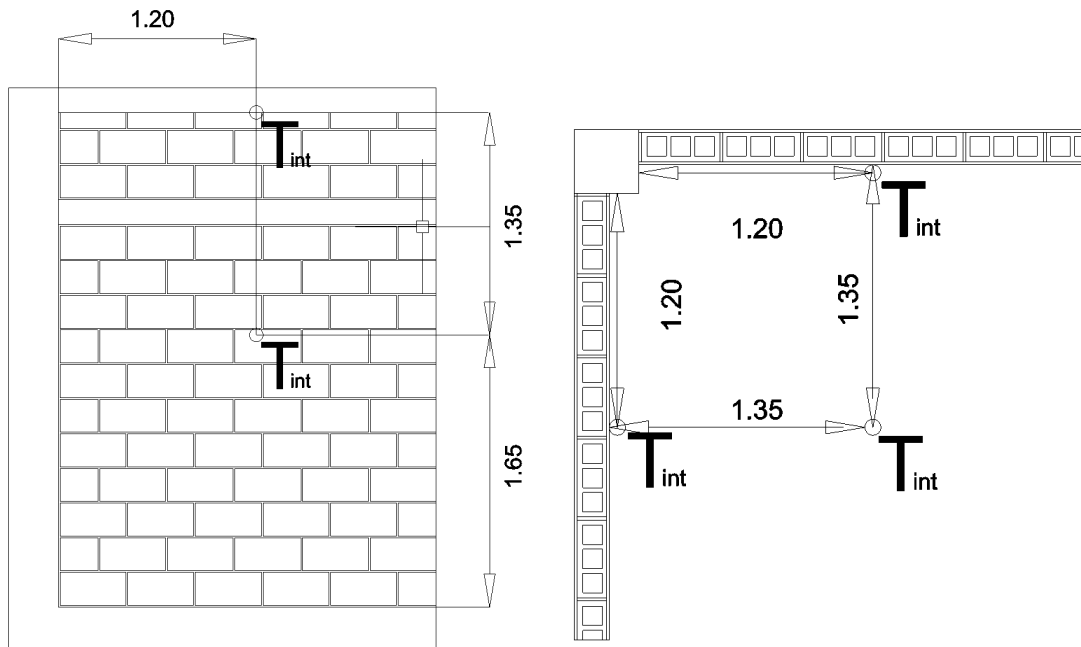


Figura 27. Ubicación de termopares en muro y en planta de intersección de muros (metros)

Los termopares cuentan con un error menor de 0.30°C , la lectura de temperaturas se realizó de manera automática por medio del adquisidor de datos, en intervalos de 1 dato por segundo, durante un periodo de 24 horas continuas. La instrumentación que tomó la lectura de la temperatura de las superficies de la estructura fue colocada con una cinta americana de 5cm de ancho, caracterizada por su adherencia y la adición de un hilado de fibras sintéticas que otorgan mayor resistencia a la tensión y tracción, debido a que fue colocada en una superficie áspera y durante un largo periodo de tiempo; además se colocó una porción de espuma rígida con conductividad de $0.023\text{-}0.026\text{ W/mK}$ (Cengel, 2011) y dimensiones de $0.03 \times 0.03 \times 0.01\text{ m}$ (b x h x e) para aislar la unión de los metales del termopar con la cinta, esto debido a que cuando la cinta sufrió la exposición directa a la radiación solar conservó calor y en algunos instantes la lectura de esta

temperatura sobrepaso la temperatura de la estructura, por lo tanto creaba un conjunto de datos erróneos al tomar la lectura de la cinta y no del muro.

Se comprobó que la longitud del cable no afecta la lectura, sin embargo para uniformizar la instrumentación la longitud de cada uno de los termopares fue de 15 m a partir de la terminal TB-4353 hacia el punto de medición.

Con el conjunto de datos obtenidos en campo los días con las temperaturas mas extremas de la temporada de invierno y de verano, se seleccionó el día que contenía el registro de temperaturas mas crítico para la alimentación del modelo computacional. (Xamán, 2017).

3.4.4 Gráficas temperaturas-tiempo de la estructura

Se presentan los perfiles de temperaturas obtenidos los días 30 de enero del 2019 y 8 de junio del 2019, donde se registraron las temperaturas mas críticas de la temporada.

Para este trabajo se define como temperatura ambiente alta aquellos valores que se presentan en temporada de verano y se encuentran en el rango de los 30° a 40° C e incluso mayor, además, se define como temperatura ambiente baja, aquella cuyos valores se presentan en temporada de invierno y están en el rango de 10° C o menos.

3.4.4.1 Curvas de temperatura obtenidas a temperatura ambiente alta

Durante la temporada de verano se observa que las temperaturas obtenidas tienden a dispersarse cuando la estructura es expuesta a la radiación del sol, las temperaturas de las superficies incrementan súbitamente hasta alcanzar valores

cercanos a 60° C. Este ambiente tiende a que algunos puntos de estudio entre las superficies de los muros norte y oeste se encuentren dispersos entre sus curvas, debido a que la recepción de la radiación no es captada uniformemente, por efecto de la posición de la estructura con respecto al sol; En la Figura 28, se muestra que las curvas que representan las temperaturas interiores sobrepasan a las curvas que contienen las temperaturas externas tanto ambientales, como superficiales. convirtiendo al interior de la estructura en un ambiente sin confort.

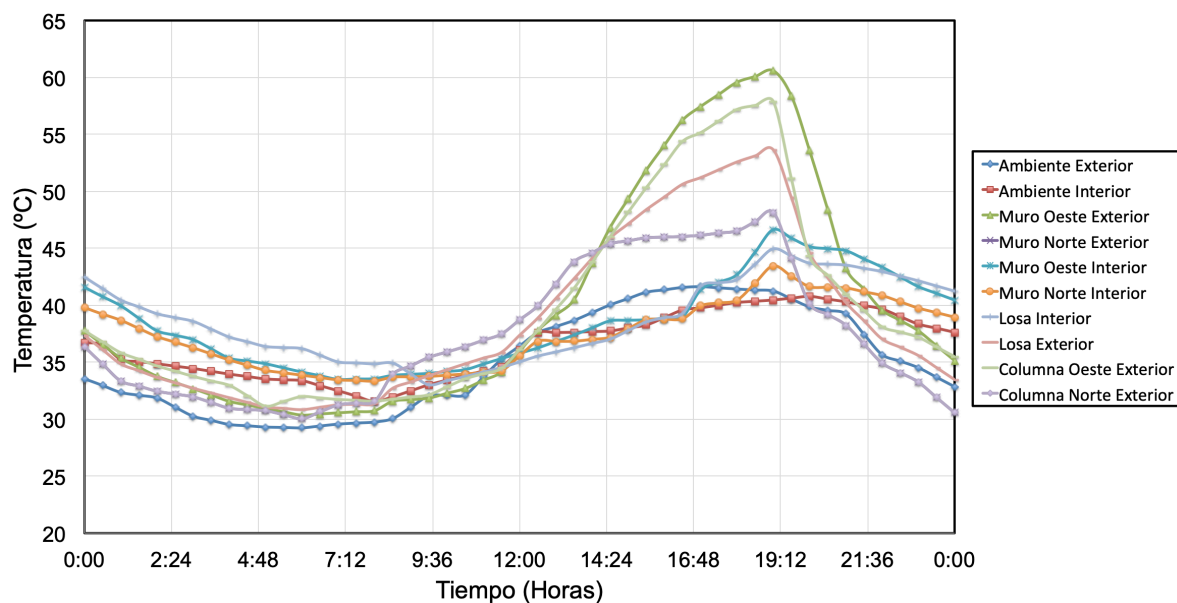


Figura 28. Perfil de temperaturas verano 2019

3.4.4.1 Curvas de temperatura obtenidas a temperatura ambiente baja

En la primera etapa se tomó lectura de las temperaturas durante el invierno del año 2019, para ello se registraron los valores de 10 puntos definidos previamente, relacionando las temperaturas ambientales externas e internas de la estructura con el tiempo, el cual fue establecido por 24 horas. En la Figura 29 se observa el comportamiento de la temperatura a través de las curvas medidas en

diferentes puntos de la estructura, donde el ascenso de la temperatura se asocia con la salida del sol y desciende con el ocaso.

Durante el invierno las temperaturas bajas provocan un enfriamiento en los elementos estructurales, la curva de la temperatura del ambiente exterior se encontró por encima de las curvas de las temperaturas superficiales, únicamente la temperatura ambiental interior logro sobrepasarla por un lapso de 45 minutos, además se aprecia que los elementos exteriores Muro norte y oeste y Columna norte y oeste alcanzaron el equilibrio térmico durante un periodo de cercano a 3:00 horas. En general, estas curvas presentan cambios suaves y paulatinos durante el transcurso del día, los cambios abruptos apreciados en este conjunto de curvas se debe a la escala gráfica

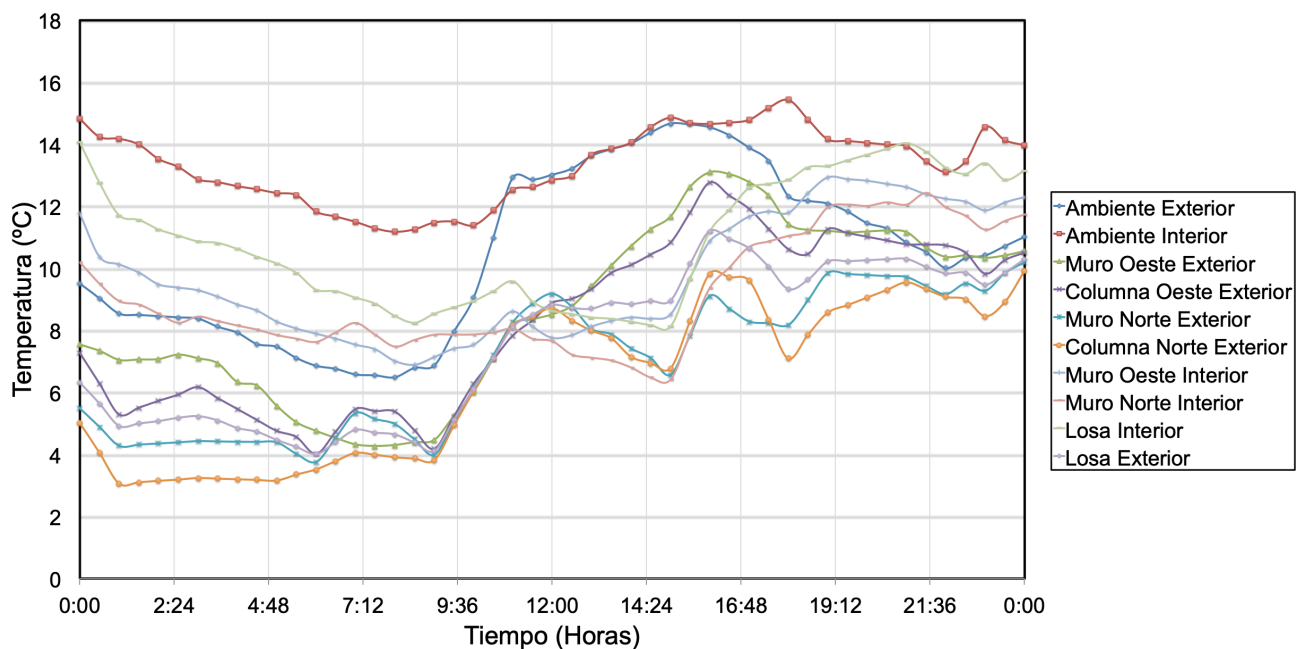


Figura 29. Perfil de temperaturas invierno 2019

3.5 MODELO TÉRMICO COMPUTACIONAL

En el modelo desarrollado fueron aplicados los mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, mediante el software conocido como Abaqus CAE se introdujeron valores de entrada predominando las propiedades térmicas específicas de los materiales utilizados en la estructura.

El software Abaqus CAE, considera que al ser aplicada una carga térmica sobre los elementos modelados, actuará de manera normal (90°) a la superficie, esta carga será la resultante de las cantidad de flujo de calor generado por la convección q_{conv} y la radiación q_{rad} , dando como resultado el flujo de calor neto q_{net} , el cual, es determinado por sistemas de ecuaciones constitutivas que el software incorpora (Dessault Systemes, 2015).

$$q_{net} = q_{conv} + q_{rad} \quad (22)$$

La convección se manifiesta mediante expresión:

$$q_{conv} = -h(\theta - \theta^0) \quad (23)$$

Donde q_{conv} es el flujo de calor debido a la convección, h representa el coeficiente de transferencia de calor por convección, θ es la temperatura sobre la superficie estudiada y θ^0 es la temperatura de un disipador de referencia.

El flujo de calor por radiación se encuentra gobernada por:

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon [(\theta - \theta^Z)^4 - (\theta^0 - \theta^Z)^4] \quad (24)$$

Donde q_{rad} es el flujo de calor por radiación, σ representa la constante de Stefan-Boltzmann con valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, ε es el valor de la emisividad del material, θ es la temperatura sobre la superficie, θ^Z es el valor de temperatura del cero absoluto (-273.15° C) y θ^0 es la temperatura ambiental.

3.5.1 Geometría

El programa Abaqus CAE, en su interface, cuenta con una serie de módulos capaces de llevar paso a paso cualquier tipo de análisis, de manera cronológica, el software requiere definir el dominio para realizar el análisis.

Se decidió modelar únicamente una porción representativa de la estructura, debido a la limitación del software para generar un gran número de elementos finitos y resolverlos, así que se optó por modelar solo una cuarta parte del total de la estructura, la cual contiene, muros de mampostería (ver Figura 30), elaborados con bloques de concreto huecos con 3 celdas y juntas de mortero Tipo 1, recubrimiento de mortero en su exterior y yeso en su interior, ambos con espesor de 1.50 cm, losa de concreto de $2.60 \times 2.60 \times 0.13 \text{ m}$ (b x h x e) y columna de intersección entre ambos muros de $0.33 \times 0.33 \text{ m}$, los elementos estructurales se consideran sin la inclusión del acero de refuerzo debido a que el porcentaje de acero por sección de estos es mínimo en comparación con el concreto (0.33 %), además de estar recubierto aproximadamente por 5 cm de material, por lo tanto no se considera que genere un gran impacto en la transferencia de calor.

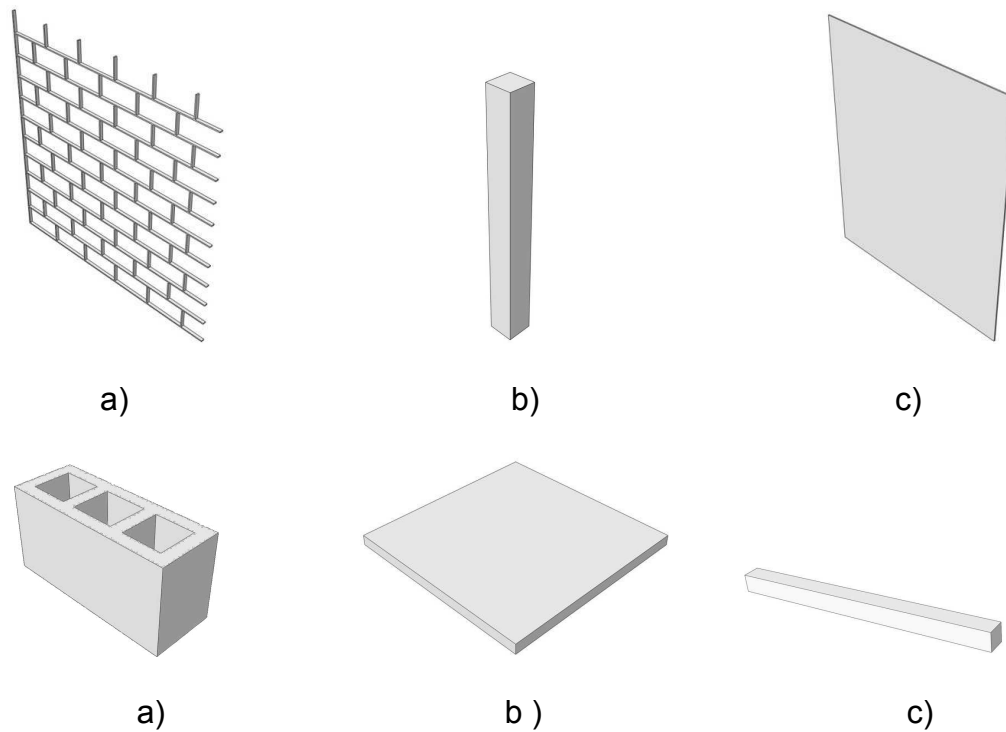


Figura 30. Estructura en estudio a) juntas de mortero, b) columna de concreto, c) acabado de mortero/yeso, d) bloque hueco de concreto, e) losa de concreto, f) viga de concreto

3.5.2 Propiedades térmicas de los materiales

Cada uno de los elementos tiene propiedades que gobiernan su comportamiento ante la acción de las temperaturas, para este trabajo se asumió que todos los elementos que intervienen en el análisis son homogéneos, continuos e isotrópicos; las razón por la cual se toman estas consideraciones es debido a la gran cantidad de nodos que el software tiene que procesar, el análisis se convertiría en una fase muy compleja y con un incremento considerable en sus horas máquina, sin embargo el software Abaqus CAE, es capaz de formular matricialmente y dependiente del tiempo la conductividad térmica en sus tres direcciones principales.

Debido a la falta de datos experimentales para alimentar el modelo computacional, se desarrollaron algunos estudios paramétricos basados en las propiedades térmicas de materiales similares encontradas en la literatura (ver Tabla 13.)

Tabla 13. Rango de valores de las propiedades térmicas y físicas de los elementos (Tae, 2013; Al-Hazmy, 2006; Del Coz Díaz, 2007; Antar, 2009; Zhang, 2009; Illampas, 2017; Kanellopoulus, 2017; Sassine, 2017, Nguyen, 2009; Raefat, 2017; Asadi, 2018; Al-Sanea, 2013)

Elemento	Rango		
	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg K)
Bloques de cemento	1650-1800	0.69-1.10	702-880
Elementos de concreto	2000-2510	0.60-3.20	795-1000
Mortero	960-2000	0.30-1.50	780-1170
Yeso	720-1680	0.178-0.372	840-1000

Se definieron cuatro tipos de modelos, los elaborados de concreto; Los bloques huecos elaborados de mezcla de cemento y agregados finos; Las juntas y recubrimientos exteriores elaboradas de mortero y el recubrimiento interior fabricado de yeso, cuyas propiedades térmicas pueden ser observadas en la siguiente tabla (ver Tabla 14.).

Tabla 14. Valores de las propiedades utilizadas en el modelo computacional

Material/Propiedad	Densidad (Kg/m³)	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg K)
Bloque de cemento	1900	0.90	1000
Mortero	2000	1.40	950
Elementos de concreto	2400	3.20	920
Yeso	1450	0.178	837

Cada una de estas propiedades utilizadas en el modelo mantienen su valor inicial a lo largo de todo el análisis. Un trabajo realizado por Covarrubias (2018) demostró que las propiedades de conductividad y calor específico de los materiales presentan variación cuando están sujetos a incrementos de temperatura por arriba de los 100° C.

3.5.3 Ensamblado del modelo

En el modulo de ensamblaje (assembly) la interface presenta un espacio para la construcción de un dominio armado, así como las condiciones y restricciones entre elementos unidos; Se comenzó por añadir las juntas de mortero que tienen contacto con el recubrimiento exterior, las cuales se modelaron como un solo elemento, exportado previamente de un archivo CAD para simplificar la modelación, cada nivel de la estructura modelada consta de cinco bloques enteros y una mitad de bloque, después se colocó una dala de cerramiento de concreto, luego se colocaron las juntas de mortero adyacentes al recubrimiento interior de la estructura, este proceso continuó hasta cumplir la altura de la estructura real (ver Figura 31).

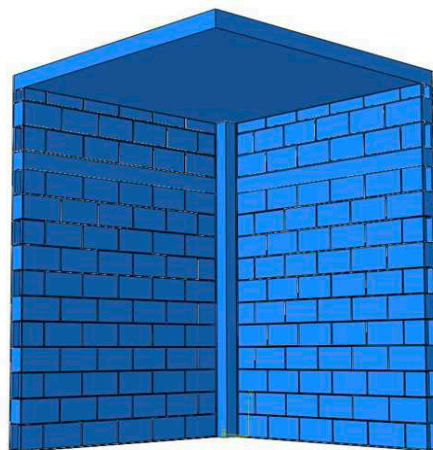


Figura 31 Modelo ensamblado

Los elementos tipo columnas y losa fueron ensamblados de acuerdo a la posición de la estructura, por último fueron colocados los acabados sobre los muros interiores y exteriores (ver Figura 32).

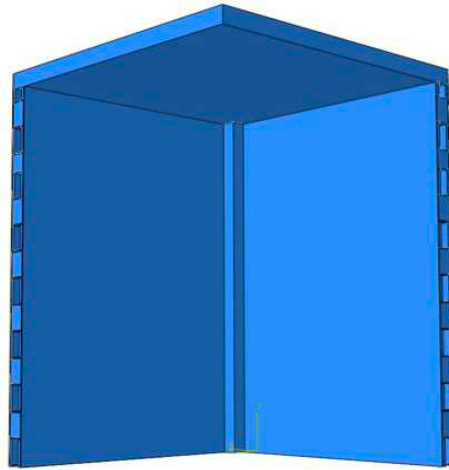


Figura 32 Modelo ensamblado con acabados

Una vez que las piezas fueron unidas, se impuso una condición de contacto entre superficies, donde los elementos contarán con un contacto de tipo “hard contact” (normal) entre ellos; Para la propagación del calor en el dominio, se impuso la propiedad llamada “tie-constraint” (ver Figura 33), donde se declara una superficie maestra y una superficie esclava, esto quiere decir que la segunda superficie obedecerá el comportamiento de la primera, en este tipo de análisis de transferencia de calor, la superficie que adquiera calor y aumente su temperatura más rápido, incrementará el calor hacia las otras superficies con las que se encuentra en contacto, por lo tanto, el elemento que cuente con menor valor de calor específico difundirá el calor hacia los demás elementos.

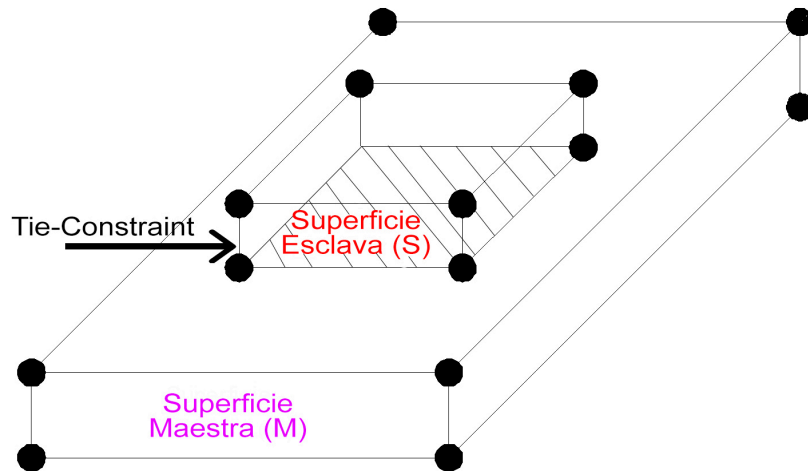


Figura 33. Esquema de restricción tipo "Tie-Constraint" (Dessault Systemes, 2015)

Las condiciones iniciales y de frontera que se establecen en el programa, definen el comportamiento del modelo, cuya función principal es simular las condiciones reales de la estructura y hacer que las ecuaciones del análisis converjan; Para este modelo en particular fueron aplicadas condiciones de frontera tanto en la base de la estructura como alrededor de la estructura en general, restringiendo los desplazamientos en el plano y liberando la rotación ($X = 0, Y = 0$ y $\theta \neq 0$) para la base y la losa ($X = 0, Y \neq 0$ y $\theta \neq 0$) tal como se muestra en la Figura 34.

Las condiciones iniciales de temperatura fueron aplicadas en todo el modelo computacional, cada elemento con la temperatura inicial correspondiente de la lectura de datos.

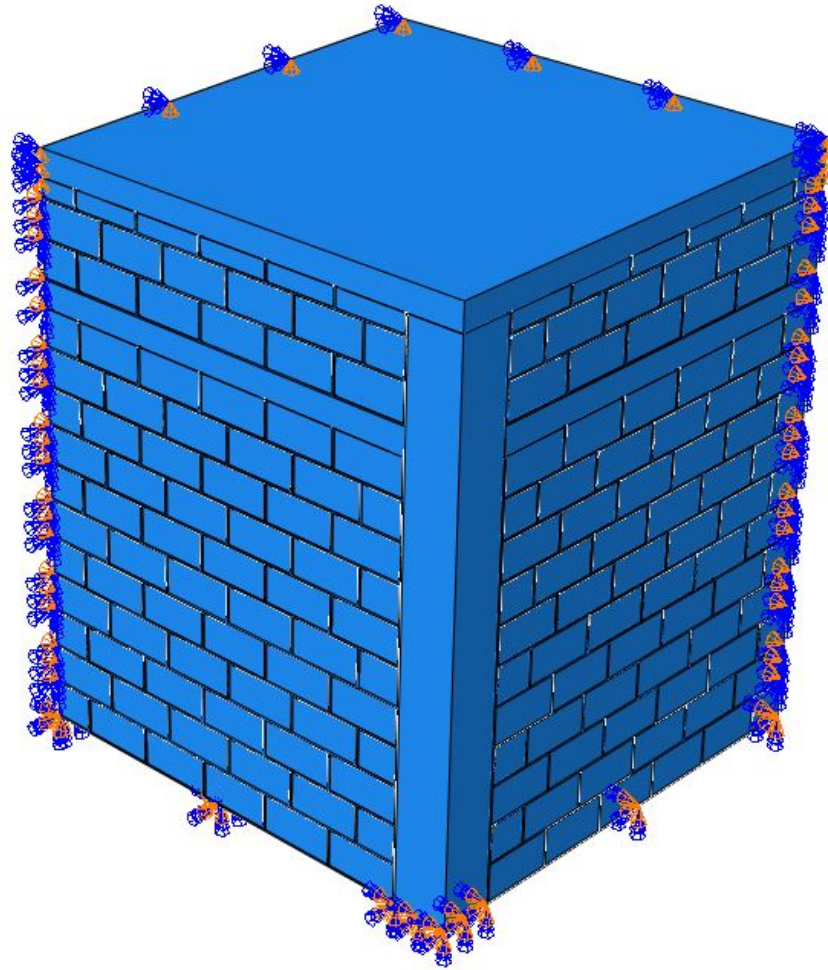


Figura 34. Condiciones de frontera en el modelo computacional

3.5.4 Tipo de elementos y mallado

Cada uno de los elementos de la estructura de mampostería, esto es, bloques, juntas y elementos de concreto fueron discretizados a través de un micromodelo para predecir la respuesta general del sistema y resolver cada uno de los grados de libertad.

Este software contiene una librería de elementos lineales, bidimensionales y tridimensionales de acuerdo al tipo de estructura que se desea resolver, el tipo de elementos utilizados en este trabajo fueron los tetraedros de 4 nodos, identificados

como DC3D4 (ver Figura 35a) (Continuo de 3 dimensiones con 4 nodos de integración reducida) con un promedio de longitud de 0.03 m (Abdulla, 2017) y también elementos tetraedros de 10 nodos identificado como DC3D10 (ver Figura 35b), los cuales contienen 10 grados de libertad por nodo, este tipo de elemento se utilizó en la metodología de Del Coz Díaz (2007), para reproducir la transferencia de calor en sólidos, sin embargo, el modelo utilizado de 4 nodos se aproxima mas a los resultados obtenidos experimentalmente.

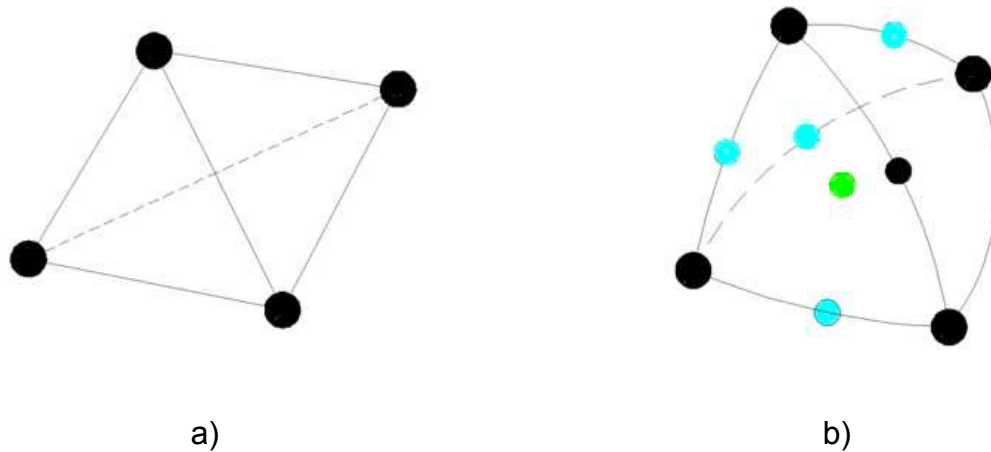


Figura 35. Tipo de elemento tridimensional utilizado a) DC3D4, b) DC3D10

El numero de nodos para cada elemento finito, se encuentra asociado al numero y familia de funciones base que el software utilizará para resolver el modelo matemático. Dicho software utiliza método numéricos para resolver la simulación requerida, a través del criterio conocido como cuadratura de Gauss y revisando el comportamiento en cada uno de los punto de integración en el dominio. Las dimensiones que se seleccionaron para el mallado se hicieron a través de un estudio de calibración detallado, basado en la curva estandarizada para pruebas de resistencia al fuego ISO-834, NMX-C-307 (Ruvalcaba, 2010; ISO,

1999; ONNCCE, 2009) y una serie de pruebas con distintos tamaños y tipo de elementos finitos de la librería del programa, finalmente los elementos del mallado tienen una relación de aspecto de $0.03 \times 0.03 \times 0.3$ m (ver Figura 36a), con excepción de los recubrimientos exteriores e interiores, donde existe una variabilidad de ajuste en las dimensiones de sus elementos para crear convergencia entre sus nodos (ver Figura 36b).

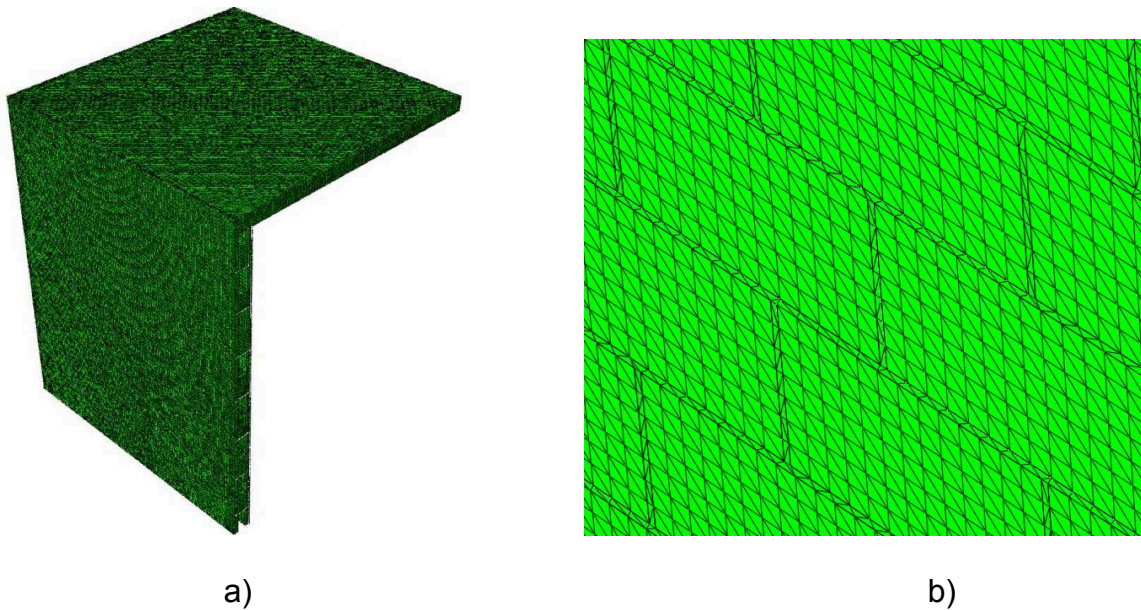


Figura 36. a) Modelo computacional mallado con elementos DC3D10, b) acercamiento sobre superficie mallada de muro

3.5.5 Modos de transferencia de calor

La transferencia del calor a través de los sólidos (conducción) se propaga de manera automática por el software una vez que es establecido en el material (Abdulla, 2017), el calor se propaga en función a la dirección en la que se aplica la carga térmica y las interacciones de radiación y convección, es decir a una variación de temperaturas en un medio considerado (Del Coz Díaz, 2005), para este modelo de estudio los materiales de la estructura se encuentran en el rango

de materiales de sólidos no metales como cerámicos o de roca, donde los valores son del orden 0.1 aproximadamente hasta 10 W/mK(°C).

La convección se propaga en el dominio como una función periódica sobre las superficies de la estructura, el modelo de convección es introducido como condiciones de filme sobre una superficie (Surface Film condition), las superficies expuestas al medio ambiente presentan un coeficiente de convección de 25W/m²K mientras que para las superficies no expuestas el coeficiente utilizado es de 4W/m²K (CEN, 2004). La interacción se presenta cuando la temperatura del fluido es mayor que la del sólido o este pierde calor cuando el sólido adquiere mayor temperatura (Incropera, 1996)

El mecanismo de transferencia a través de la radiación térmica se modela mediante una condición de interacción sobre las superficies exteriores e interiores, debido a que la función en dirección normal a la superficie tiende a recibir la radiación, mientras que la superficie exterior emite radiación hacia el entorno interior de la estructura. Para la modelación de esta interacción es necesaria la función periódica de la temperatura ambiental y el valor de emisividad del material.

La interacción utilizada para este modo de transferencia se conoce como radiación de la superficie (Surface radiation) la cual requiere que los atributos del modelo sean activados, la constante de Stefan-Boltzmann con valor de 5.67×10^{-8} W/m²K⁴ y la condición de cero absoluto de -273.15 °K (Dessault Systemes, 2015) fueron utilizados en el modelo (Ruvalcaba, 2010).

3.5.6 Tipo de análisis

Para este trabajo llevó acabo un análisis del tipo transferencia de calor (Heat Transfer) y un paso (Step) inicial donde fueron establecidos campos predefinidos de temperatura en el dominio completo por las temperaturas iniciales: superficies exterior, cuerpo interior y superficie interior, estas temperaturas fueron obtenidas mediante la lectura de datos de campo.

En el análisis de transferencia se considero un análisis en el estado estacionario (Steady State) omitiendo el termino de energía interna, esto significa que el análisis de este problema no tiene escala, aun así, es posible la asignación de un incremento inicial de tiempo, perdido de tiempo como fue la inclusión de una función de temperatura y los incrementos de tiempo máximos y mínimos (Howells, 2015).

Los datos utilizados para este análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 15. Resumen de datos para Step (Heat transfer)

Dato	Valor
Respuesta del análisis	Estado estacionario (Steady state)
Tiempo del periodo	24
Tipo de incremento	Automático
Numero máximo de incrementos	1000
Tamaño del incremento inicial	1
Tamaño del incremento mínimo	0.00024
Tamaño del incremento máximo	24
Máximo cambio de emisividad permitido	0.1

Los datos de salida fueron modificados para que la frecuencia de cada unidad de tiempo (x) fuese igual a 0.10 por unidad, por lo tanto en cada hora existen 10 valores con los cuales se calibró el modelo computacional, además de visualizar la evolución de la temperatura sobre el tiempo en la estructura y los diferentes materiales con mayor precisión.

Para la aplicación de la carga térmica las temperaturas obtenidas a través del adquisidor de datos fueron ingresados en el programa Abaqus CAE como una función periódica (tiempo vs temperatura) de la misma cantidad de incrementos que han sido establecidos en los ajustes de análisis.

3.6 MODELOS ALTERNOS

3.6.1 Propiedades térmicas de los modelos alternos

En este trabajo de investigación, se presentan dos modelos alternos de la misma estructura estudiada, el “Modelo 1” utiliza piezas de mampostería cuyas propiedades representan a los bloques de concreto ligero (BCL), el “Modelo 2” utiliza piezas cuyas propiedades le pertenecen a los bloques de arcilla extruida (BAE), el propósito del desarrollo de estos modelos computacionales es comparar la respuesta térmica entre el “Modelo original” y los modelos alternos para determinar la configuración que tiene mejor desempeño ante las cargas térmicas.

Los valores de las propiedades de los modelos alternos se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 16. Rango de valores para propiedades de los materiales alternos (ACI-122R, 2002; Gallegos, 2005; Remesar, 2017; Molar-Orozco, 2017; Nguyen, 2009; Raefat, 2017; Custodio-García, 2005; Lira-Cortés, 2008; Sassine, 2017)

Elemento	Rango		
	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico
Bloques de concreto ligero	1650-1800	0.69-1.10	702-880
Bloques de Arcilla	1830-2000	0.35-0.70	870-1000

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del modelo computacional desarrollado a través del método del elemento finito de la estructura de mampostería, la cual esta expuesta a temperaturas extremas ambientales de la zona metropolitana de Monterrey.

También se presenta la evolución de las temperaturas aplicadas en la estructura, así como el desempeño térmico que presenta la

4.1 RESULTADOS TÉRMICOS DEL MODELO

En este apartado, se muestran los resultados obtenidos del modelo computacional para evaluar el comportamiento térmico de una estructura prototipo, obteniendo las temperaturas de las superficies internas de los elementos, asimismo la distribución y difusión del calor.

El software Abaqus CAE, permite la salida de datos del nodo NT11, indicando la temperatura resultante por efecto de los tres mecanismos de transferencia en cada nodo; Se presenta en la Figura 37, los puntos nodales de

referencia que se utilizaron en el modelo analítico para extraer la información de temperaturas en las superficies de los muros y azotea.

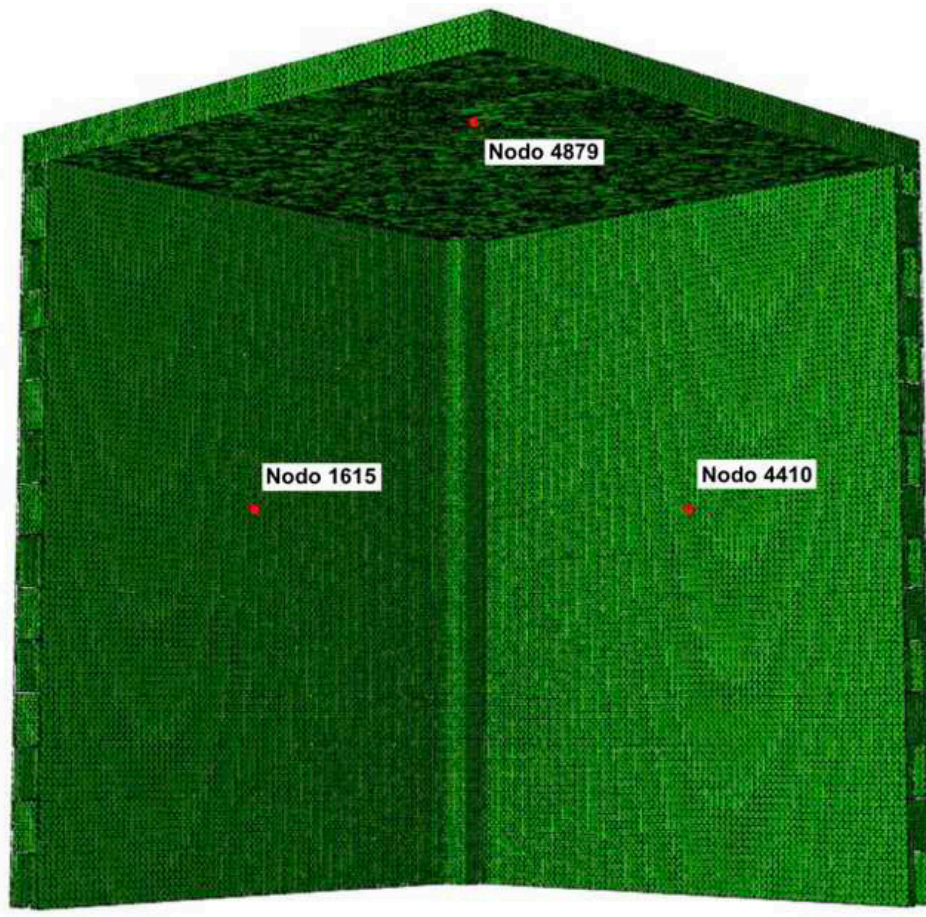


Figura 37. Ubicación de nodos analizados en el modelo computacional

4.1.1 Curvas a temperatura ambiental alta

Los resultados obtenidos se presentan en un grupo de curvas para cada modelo. En la Figura 38 se muestran las curvas de temperatura superficial del Muro oeste interior, Muro norte interior, losa interior y la temperatura ambiental exterior; Se registraron 48 puntos de lectura para el perfil, la figura indica que las temperaturas alcanzadas fluctúan entre 33 a 50 °C Se puede ver que el conjunto

de curvas presenta un comportamiento cuasi-senoidal, además, los tres elementos estructurales tienen mayor temperatura que la curva de temperatura ambiental exterior, encontrando el balance térmico durante un periodo de 10:00-13:00 horas.

El pico máximo de los perfiles se presenta a las 19:00 horas con 49.178 °C en la superficie del “Muro Oeste” de la estructura, por lo tanto es el que transfirió mayor calor hacia el interior de la estructura mediante su radiación térmica.

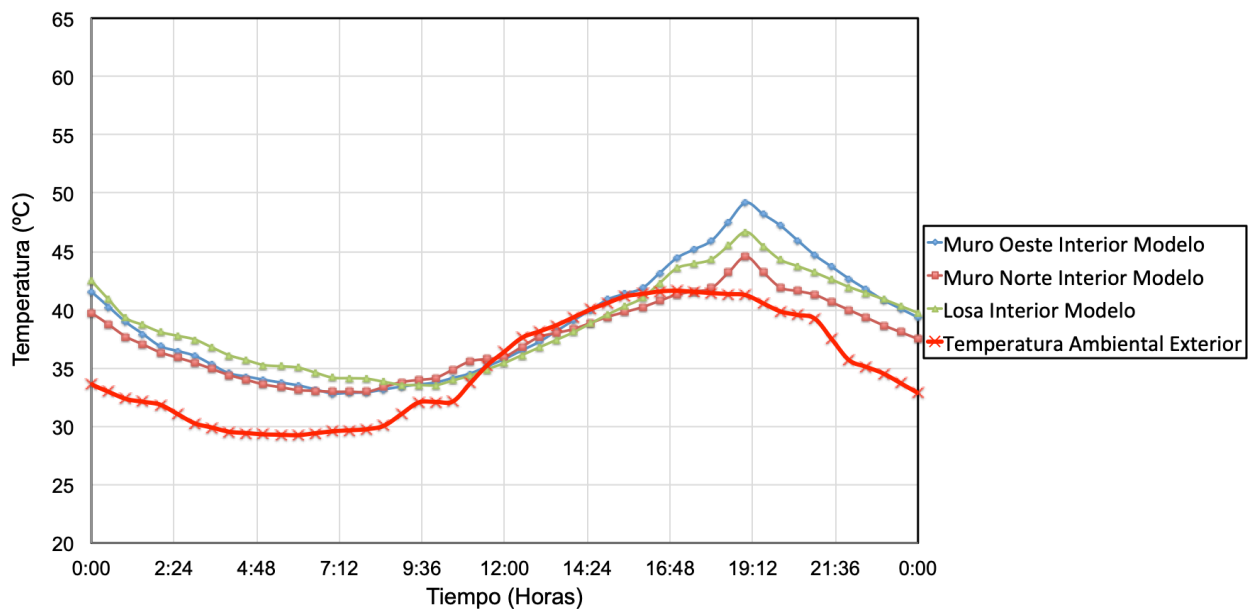


Figura 38. Relación temperatura-tiempo en la condición de temperatura ambiental alta

4.1.2 Curvas a temperatura ambiental baja

Se observan en la Figura 39 las curvas de temperatura corresponden a los elementos analizados el día 30 de enero de 2019, cuyas temperaturas fueron del orden de 6 a 14 °C, mostrando que las curvas de los nodos representativos a los muros norte, muro oeste y losa interior presentan un comportamiento semi-paralelo durante las 24 horas de análisis, mayormente durante las primeras cuatro

horas del día y las ultimas seis; Se observa que el muro oeste y muro norte logran alcanzar el balance térmico durante el periodo de las 13:00 a 16:20 horas. Las curvas obtenidas se encuentran por debajo de la curva de la temperatura ambiental exterior durante el análisis, el valor mínimo se presentó a las 15:00 horas con 6.55 °C registrados en el “Muro Norte”.

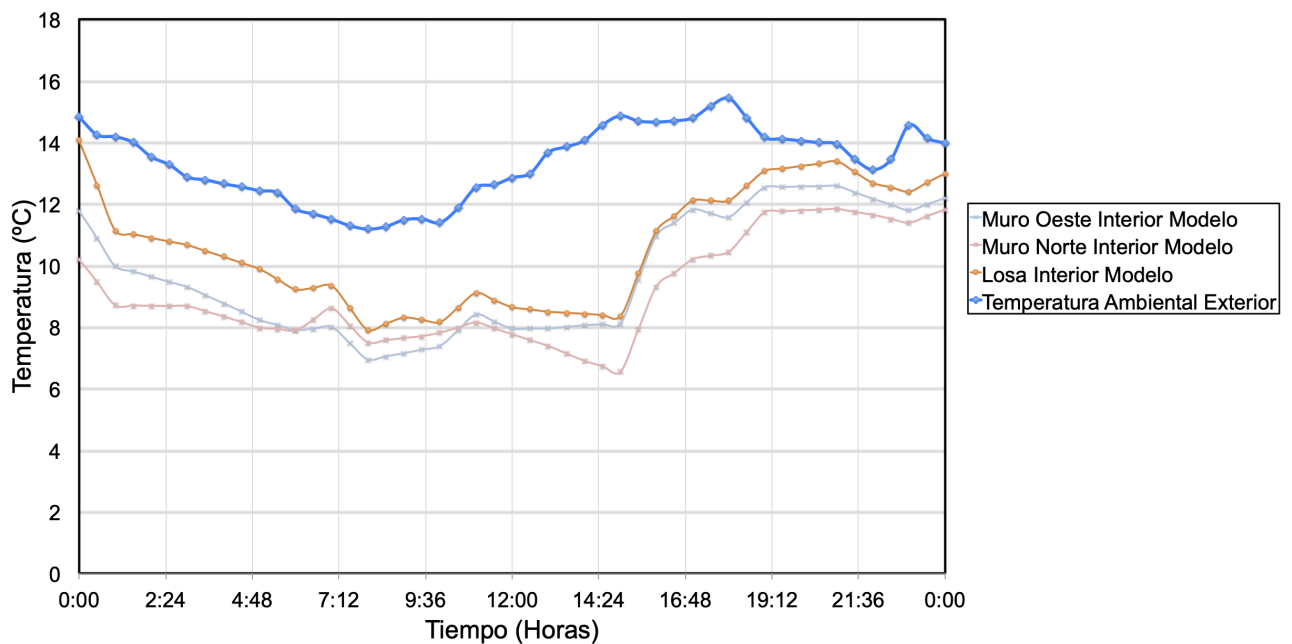


Figura 39. Relación temperatura-tiempo en la condición de temperatura ambiental baja

4.1.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta

Se presentan los mapas de contorno de distribución de las temperaturas (NT11) en las superficies interiores y exteriores de la estructura, en esta sección fueron seleccionados los gráficos que representan las temperaturas a las 00:00 y 24:00 horas de los análisis realizados por el software Abaqus CAE el día 08 de junio de 2019.

La Figura 40 muestra la distribución del calor en las superficies exteriores de la estructura a las 00:00 horas, se observa que la superficie del muro oeste y la azotea mantienen una temperatura uniforme, la temperatura del muro norte comienza a diferir por zonas, debido a que la curva de temperatura se encuentra en una etapa de descenso, los elementos de concreto reforzado y las juntas de mortero comienzan a perder calor con mayor rapidez. A pesar que el mapa de contorno solo muestra dos colores distintos, existe una variación de temperatura de aproximada de 0.44 a 0.87 °C.

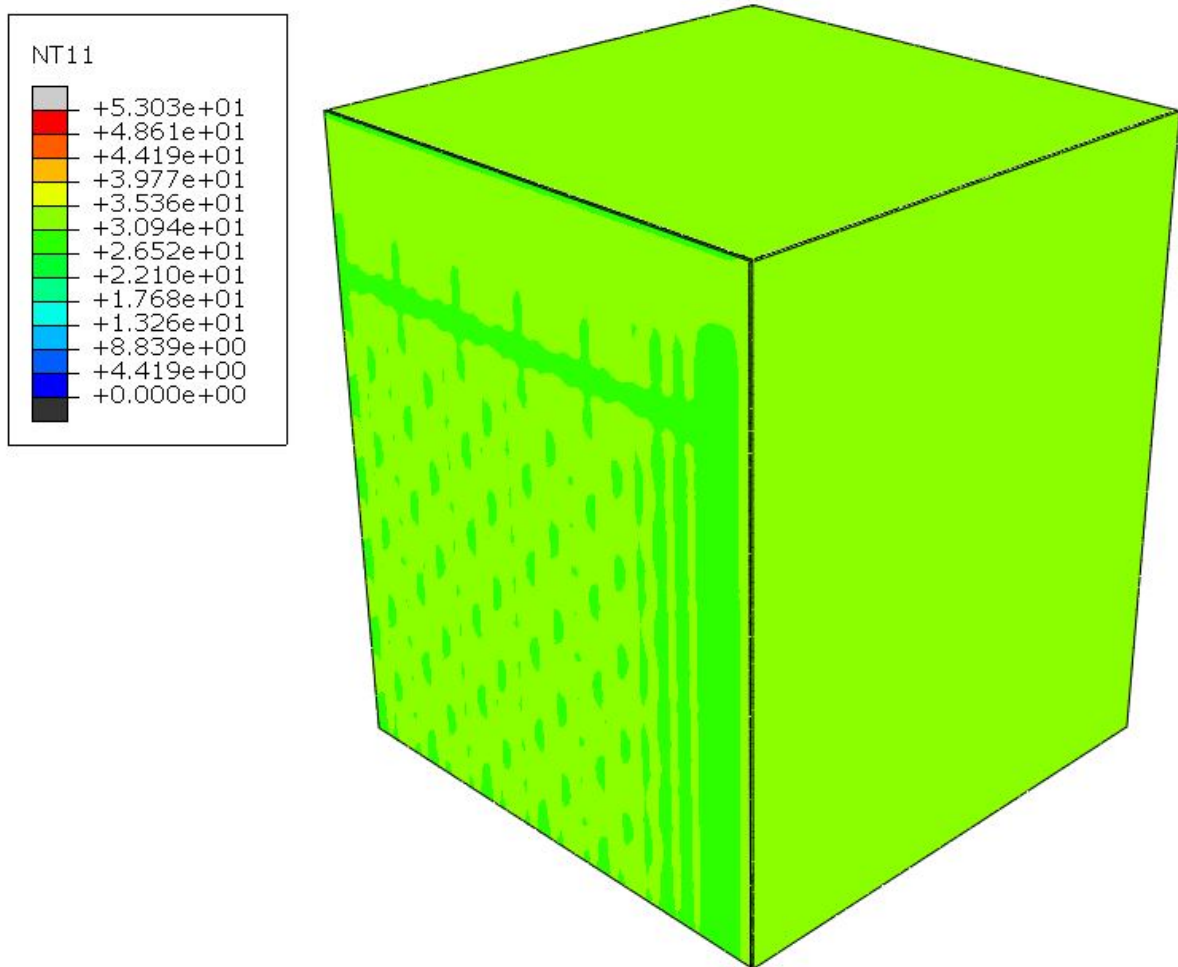


Figura 40. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (00:00 hrs) en °C

En la Figura 41 se presenta la distribución de temperatura a las 00:00 horas en superficies interiores, se muestra que la temperatura entre muro norte y muro oeste es uniforme, esto ocurre se debió a que la masa térmica interior se mantiene a una temperatura, sin embargo, la azotea se comporta diferente, este elemento se encuentra en un proceso de liberación de calor con dirección hacia el interior de la estructura, alcanzando temperaturas cercanas a los 40 °C, lo cual afecta directamente a la temperatura ambiental interior por los procesos de convección y radiación.

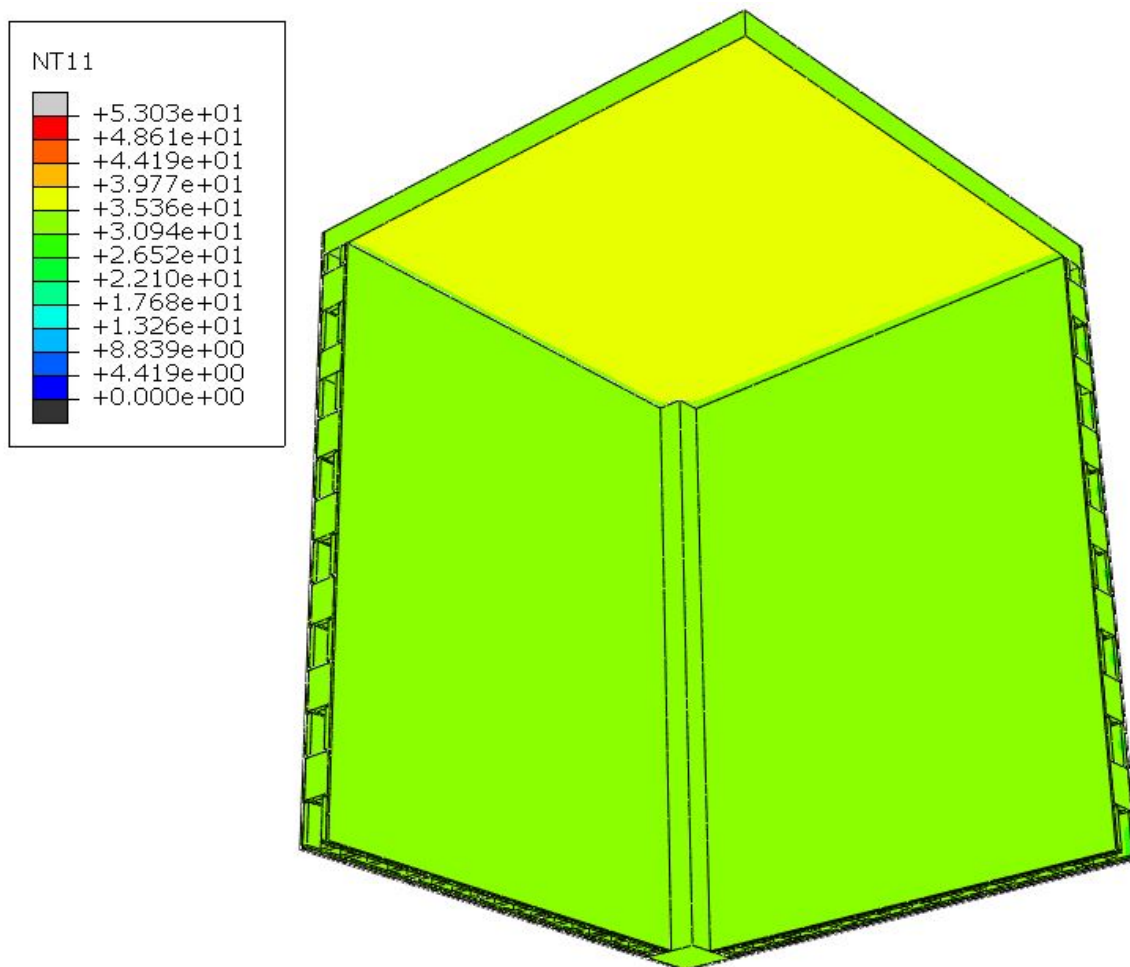


Figura 41. Distribución de la temperatura interior en la estructura (00:00 hrs) en °C

La estructura estudiada a las 24:00 horas muestra un comportamiento cíclico, desde el inicio hasta el final del análisis, como se puede ver en la Figura 42, no existe diferencia significativa entre las temperaturas de las 00:00 y las 24:00 horas, puesto que su perfil de temperatura-tiempo se presenta bajo esta idealización de la curva (Ver Figura 38).

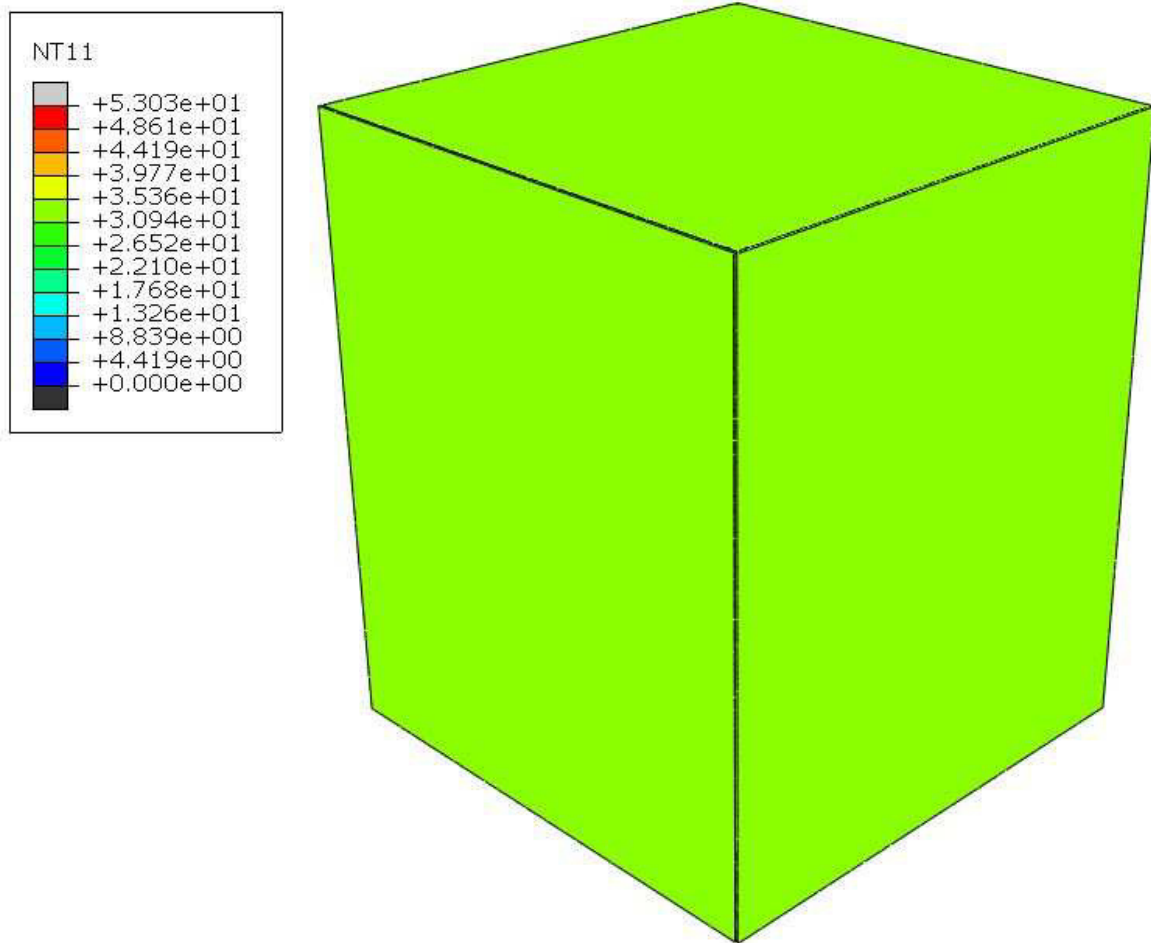


Figura 42. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (24:00 hrs) en °C

Se observan en la Figura 43 las superficies interiores de la estructura a las 24:00 horas, las temperaturas del muro oeste y azotea, son mayores con respecto a la temperatura del muro norte (+0.45 °C), eso se debe a que la influencia de la radiación solar afectó con mayor intensidad y dirección angular a estos elementos.

También, se observó que la evolución de las temperaturas interiores, son semejantes a las temperaturas del modelo inicial a las 00:00 horas, debido a que el modelo computacional contó con una función tiempo-temperatura que reflejaba esta conducta.

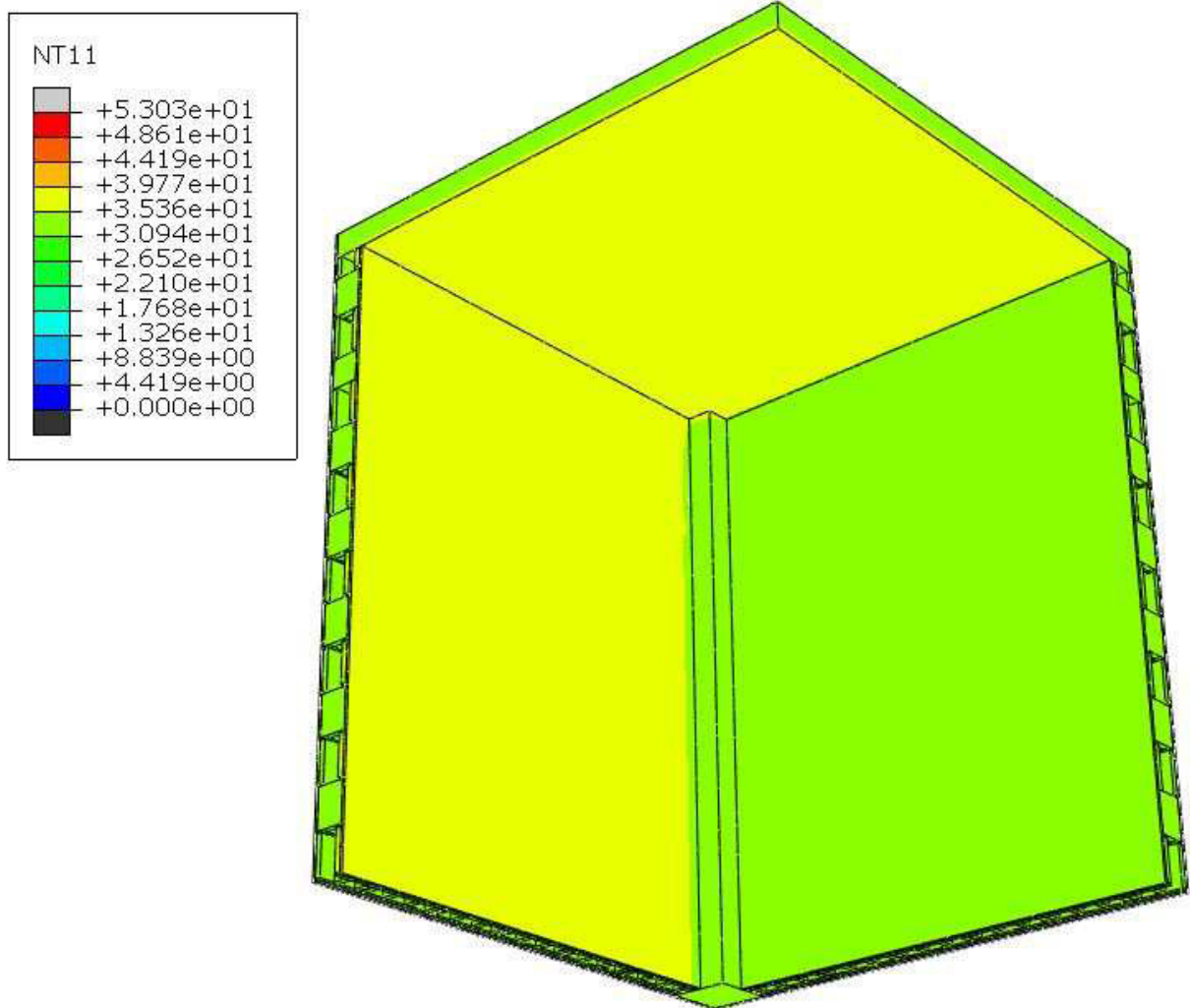


Figura 43. Distribución de la temperatura interior en la estructura (24:00 hrs) en °C

4.1.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental baja

Se presentan los modelos computacionales el día 30 de enero de 2019 sometidos a temperaturas bajas, así como la interpretación de su comportamiento en esta sección.

El modelo computacional mostrado en la Figura 44, presenta un comportamiento muy similar al modelo sometido a temperaturas ambientales altas, la temperatura superficial a las 00:00 horas del muro oeste y azotea se mantiene uniforme, mientras que el muro norte se encuentra con menor temperatura ($-2.35\text{ }^{\circ}\text{C}$), esta diferencia se debe al contacto que tuvo esta superficie con el viento y la menor cantidad de radiación recibida.

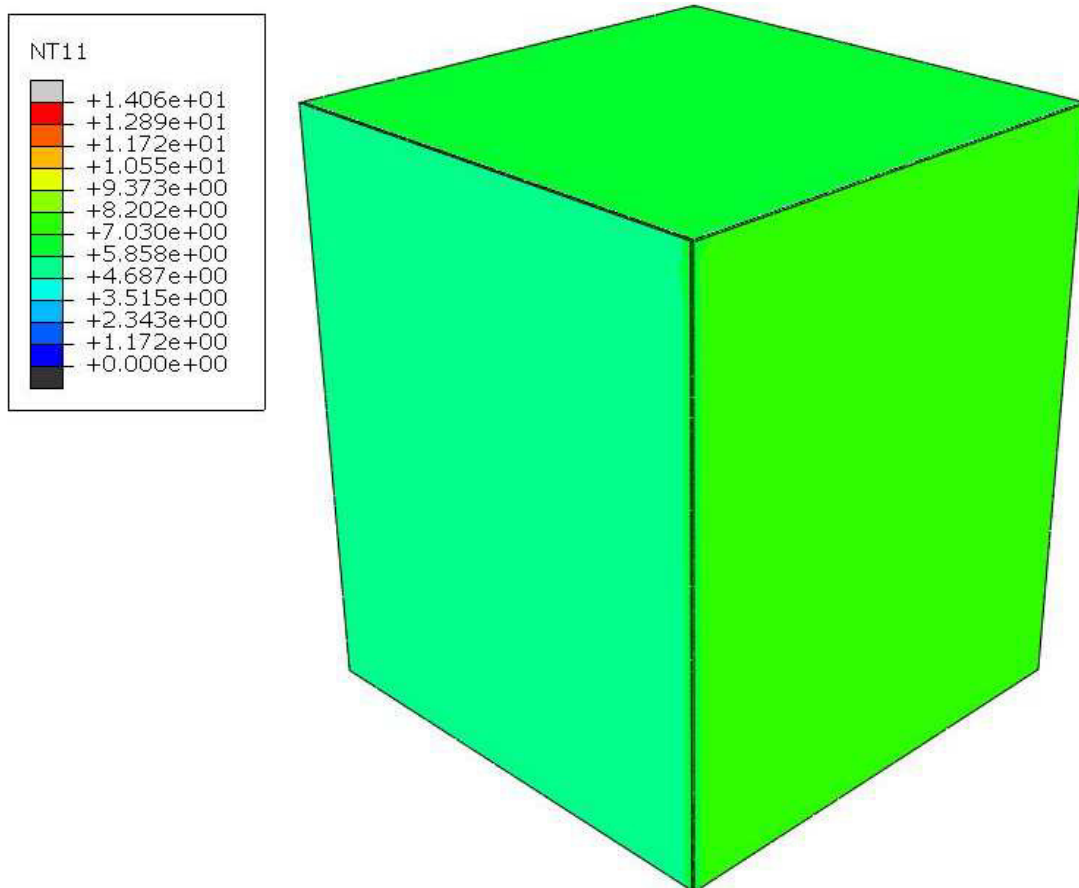


Figura 44. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (00:00 hrs) en $^{\circ}\text{C}$

La distribución de la temperatura se presenta con mayor variación en este modelo (ver Figura 45), se muestra la distribución a las 00:00 horas de las superficies interiores, la cual se hace presente en las zonas donde se ubican los huecos de las piezas de mampostería, debido a que el calor se propaga con menor velocidad mediante el mecanismo de convección, sin embargo, la diferencia entre temperaturas no es significativa ($-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$) con respecto a la temperatura superficial donde se encuentran las juntas de mortero; La difusión del calor, se puede apreciar con mayor intensidad en la superficie del muro oeste, donde este elemento intenta alcanzar la misma distribución térmica en toda su superficie

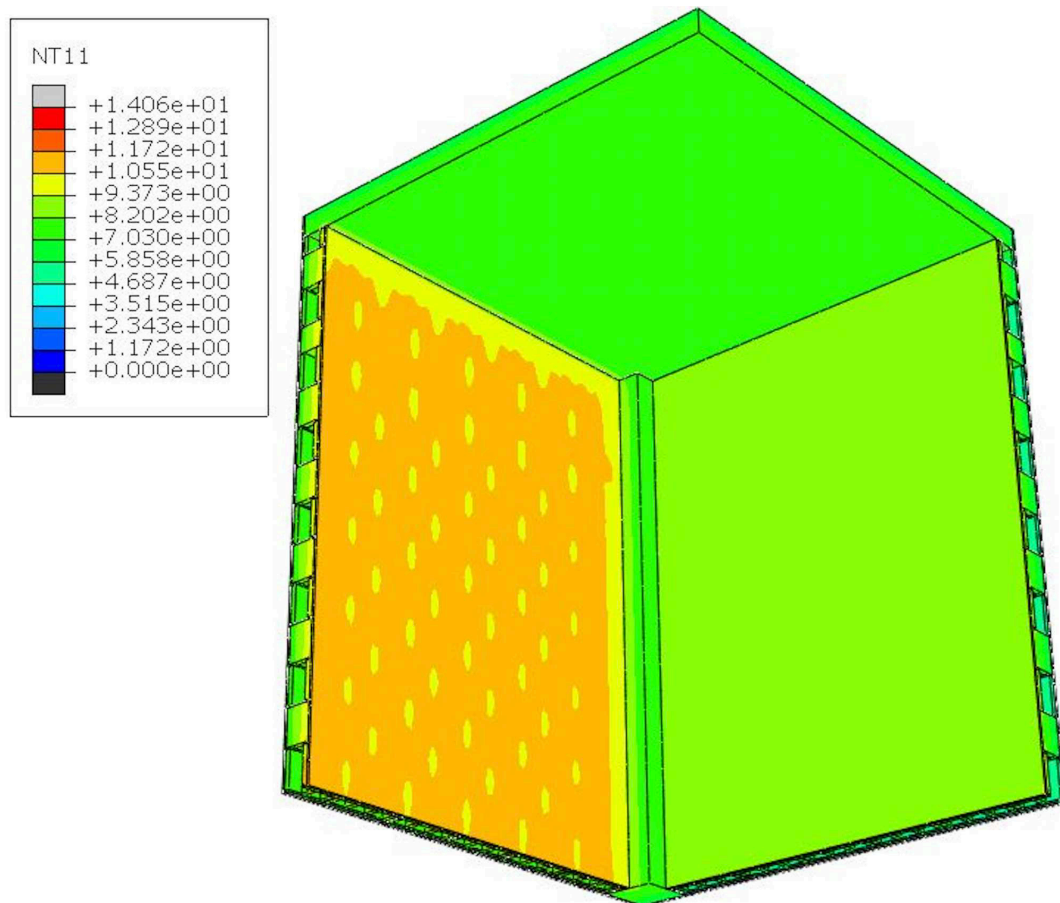


Figura 45. Distribución de la temperatura interior de la estructura (00:00 hrs) en $^{\circ}\text{C}$

En el modelo desarrollado para las 24:00 horas (ver Figura 46) se observa que a diferencia de los modelos evaluados con temperaturas ambientales altas, este no cumple con un comportamiento cíclico al inicio y final de su análisis, uno de los factores que influyeron en este desempeño fue la radiación recibida por la estructura principalmente por el muro oeste, donde este alcanzó una temperatura de 11.67 °C, a diferencia del muro norte y la azota conservaron una temperatura de 10.65 °C. También se puede observar que en la zona de contacto entre la losa y las piezas de mampostería existe mayor temperatura, lo cual indica que el calor no se ha liberado completamente para uniformizar su temperatura en toda la superficie.

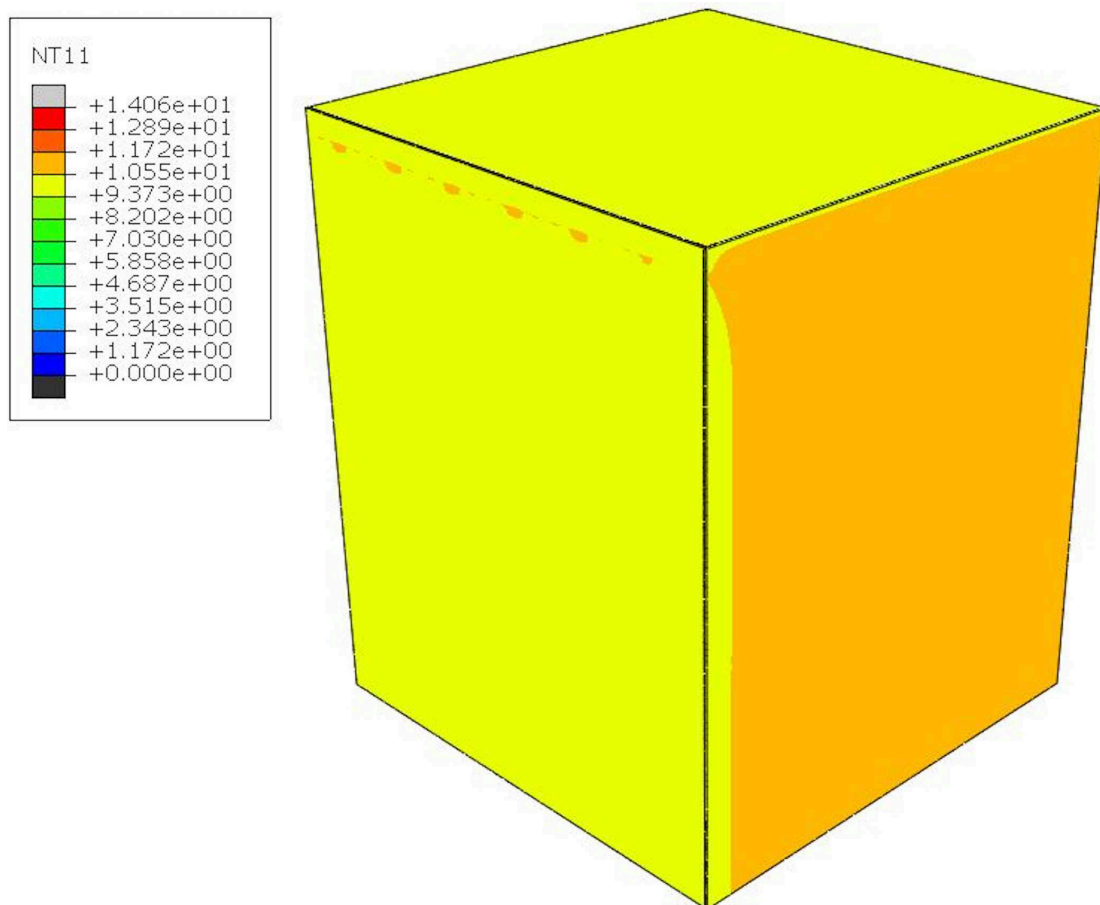


Figura 46. Distribución de la temperatura exterior en la estructura (24:00 hrs) en °C

La evolución de la temperatura en los muros norte y oeste se observa de forma gráfica en la Figura 47, donde se muestra que el aumento de la temperatura tuvo mayor presencia en la azotea, hacia donde se manifiesta la liberación del calor con dirección al interior de la estructura, manteniendo una temperatura de 13.21 °C, aproximadamente 3 °C mayor que los elementos adyacentes, sin embargo, se puede observar que el elemento “columna” perdió calor con mayor velocidad por dos factores importantes: la conductividad del concreto que es predominantemente mayor que cualquier material de la estructura y el volumen de la columna es pequeño con respecto a los otros elementos estructurales.

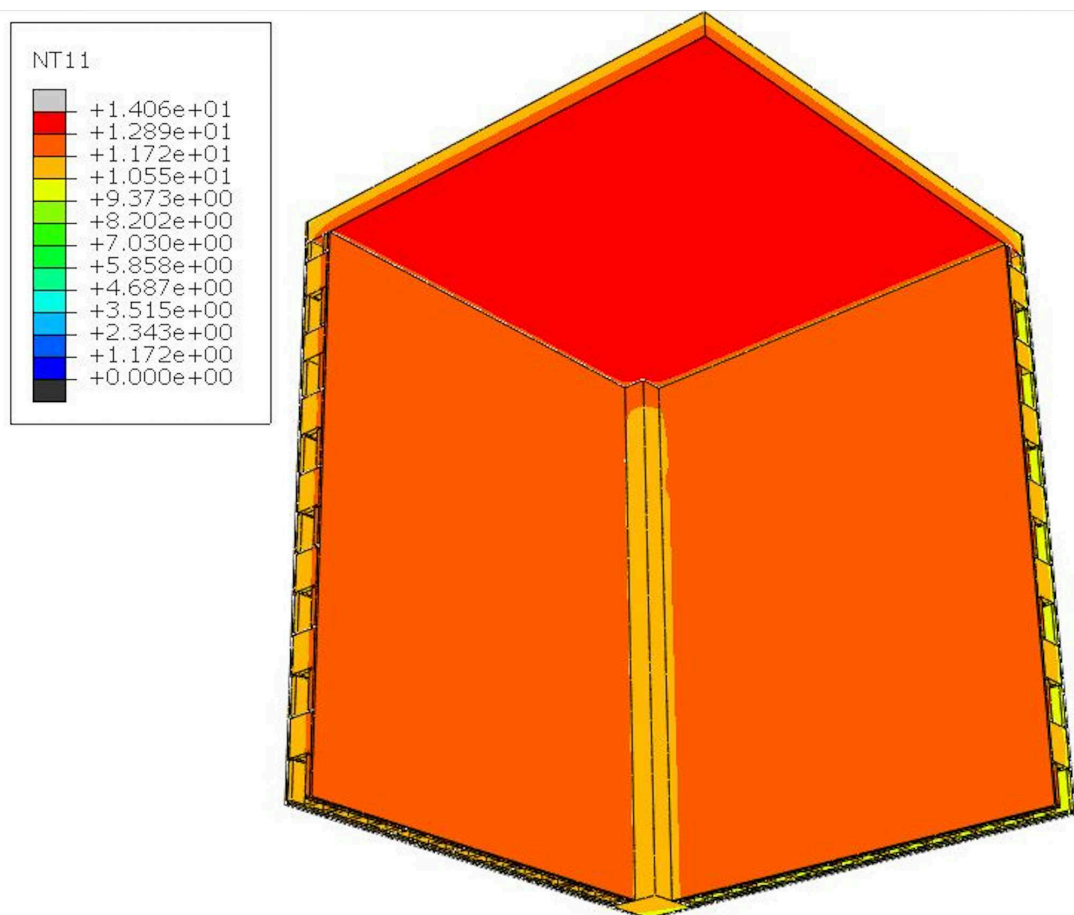


Figura 47. Distribución de la temperatura interior en la estructura (24:00 hrs) en °C

4.2 RESULTADOS TÉRMICOS DE LOS MODELOS ALTERNOS

En este apartado se muestran las curvas de temperatura de los modelos computacionales alternos, modificados en base a las propiedades térmicas de las piezas de mampostería; Llamando Modelo 1, al simulado con bloques con propiedades de arcilla extruida (BAE) y Modelo 2, para el simulado con bloques con propiedades de concreto ligero (BCL); las juntas de mortero y los elementos de concreto estructural ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) conservan sus propiedades originales (ver Tabla 14), obtenidas a través de estudios paramétricos.

4.2.1 Modelo de bloques de arcilla extruida (BAE) Modelo 1

Se determinó utilizar bloques de arcilla extruida debido a que son el segundo tipo de bloque con mayor comercialización en la zona norte del país.

4.2.1.1 Curvas de temperatura ambiental alta

El comportamiento del modelo con estas piezas (BAE), mostró una diferencia en su evolución con respecto a la configuración original de la estructura; En la Figura 48, se observa que las curvas de temperatura de los muros norte y oeste mantuvieron un comportamiento cuasi-paralelo y cercano al equilibrio térmico entre ambas curvas, entre las 00:00 a las 09:30 horas. Se observa que las curvas de los muros se presentan por debajo de la temperatura ambiental exterior el valor máximo de temperaturas se ubica en la curva de losa con 46.342°C , mientras que en el Muro Oeste y Muro Norte la temperatura máxima es de 42.357°C y 41.290°C respectivamente.

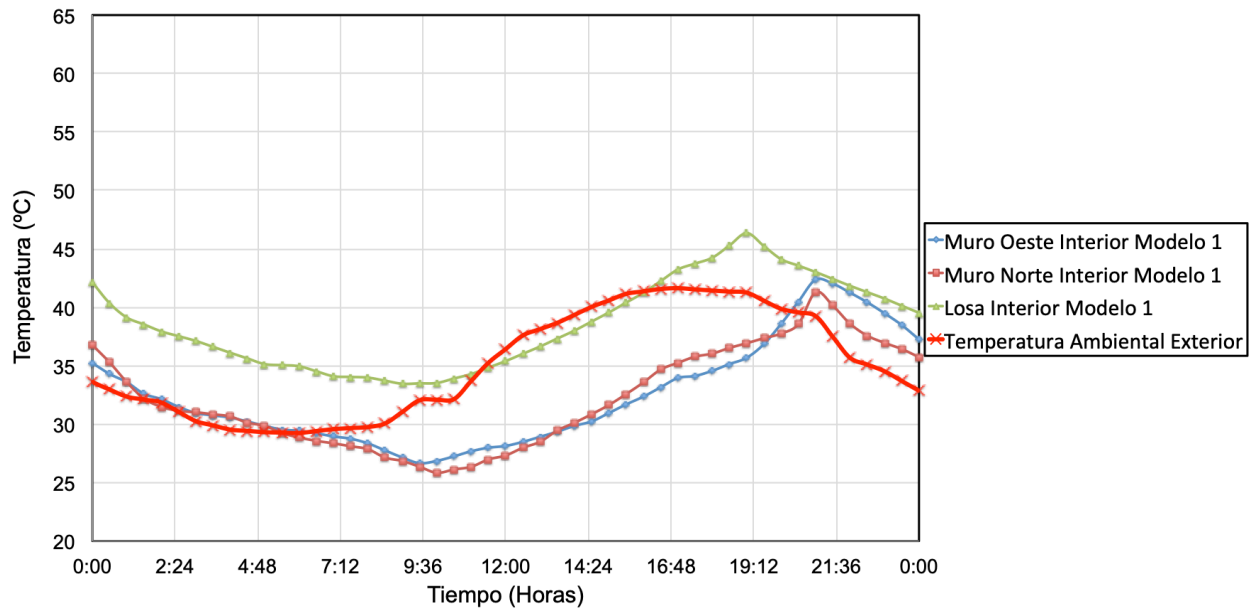


Figura 48. Curva de temperatura ambiental alta del Modelo 1

4.2.1.2 Curvas de temperatura ambiental baja

La evolución de las temperaturas ambientales bajas de los muros y azotea se presentan en las curvas de la Figura 49, se muestra un comportamiento con cambios de pendiente constantes, además, se puede ver que las tres curvas convergen de las 07:00 a las 12:00 horas esto se asume a masa interior de la estructura se mantenía con una temperatura constante a pesar del cambio de la curva de temperatura ambiental exterior.

El efecto de la radiación proveniente del sol tiene una mayor influencia y actúa con mayor intensidad sobre la losa; teniendo en su curva un valor máximo de 13.214 °C a las 21:00 horas, mientras que el valor mínimo del perfil se presenta en la curva del muro oeste, alcanzando 7.838 °C a las 09:30 horas.

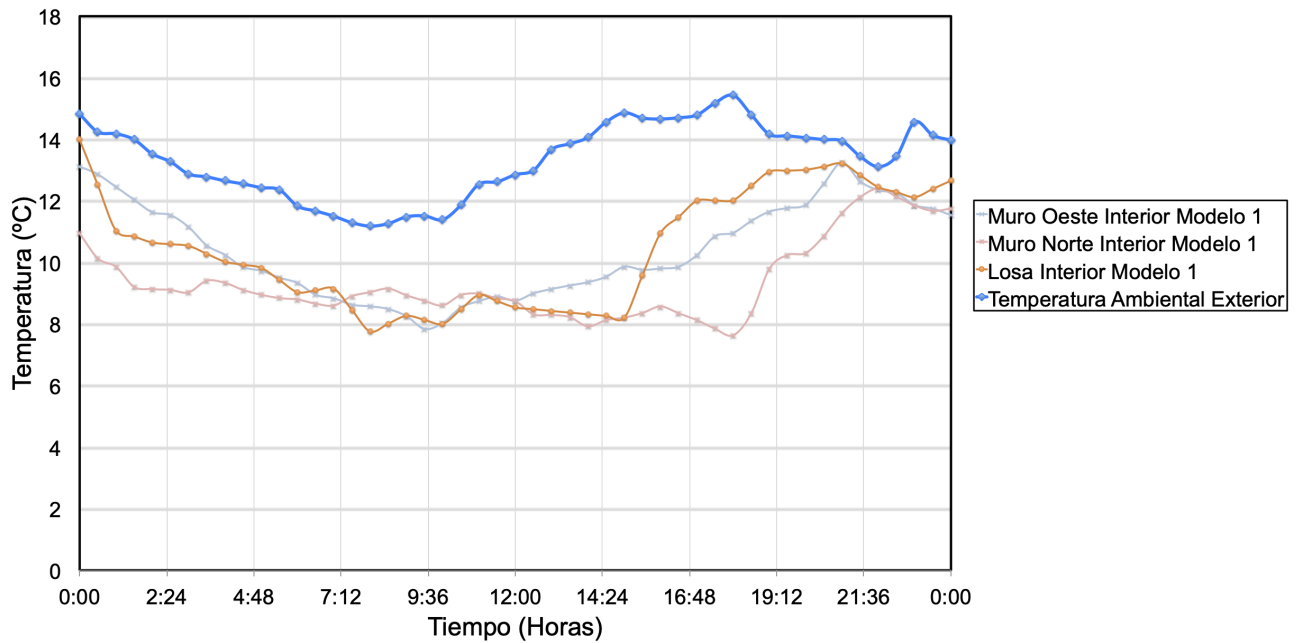
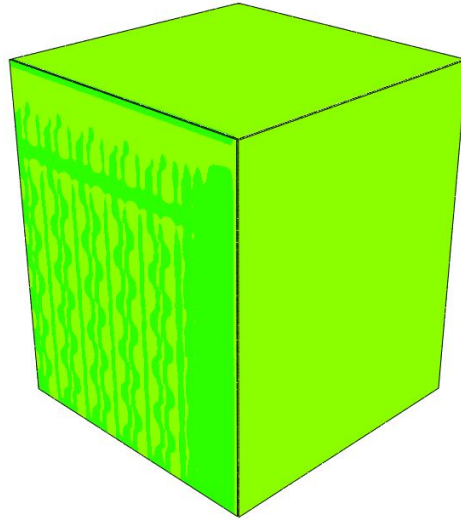
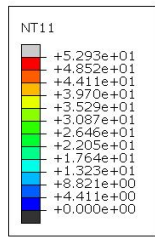


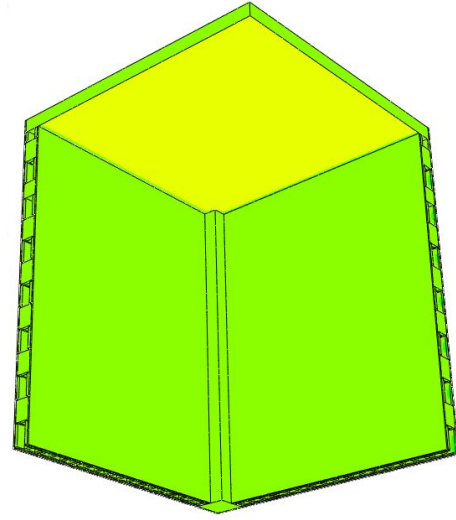
Figura 49. Curva de temperatura ambiental baja del Modelo 1

4.2.1.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta

En la Figura 50 a) y 50 b), se aprecia el comportamiento de la estructura original modelad en el software, se logra apreciar una distribución de temperatura casi uniforme a la caras exteriores e interiores en ambos casos. En la superficie exterior a las 00:00 horas, se aprecia un efecto distinto al modelo original en el muro oeste, esto podría deberse a que los bloques de arcilla retardan el flujo de calor puesto que su valor de conductividad térmica es menor que la de los bloques de concreto utilizados en el modelo original, es por ello que en los espacios sólidos empieza a ver pérdidas de calor en la dirección normal a la superficie del muro norte, Por otra parte, en la Figura 51 se observa una clara distribución uniforme en todas las caras exteriores de la estructura, considerándose el balance térmico a las 24:00 horas, proceso del cual no se logra presentar por completo en las caras interiores del modelo de la estructura.

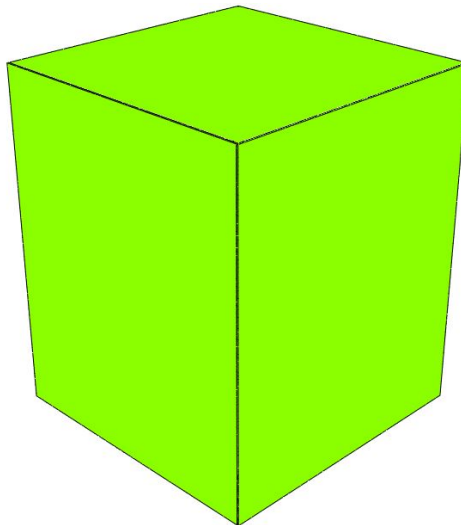
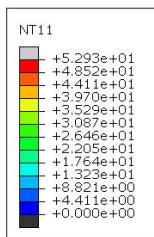


a) Caras exteriores

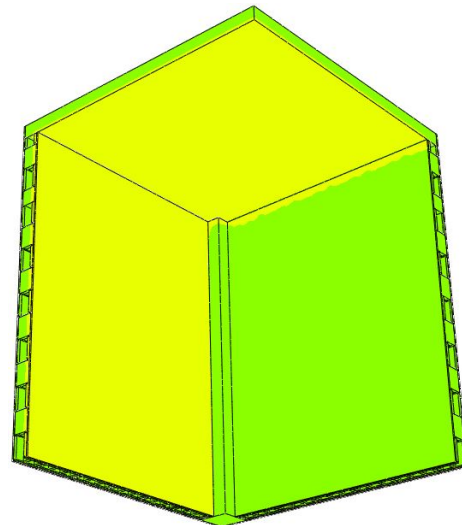


b) Caras interiores

Figura 50. Distribución de la temperatura ambiental alta (00:00 hrs) ambas caras



a) Caras exteriores



b) Caras interiores

Figura 51. Distribución de la temperatura ambiental alta (24:00 hrs) ambas caras

4.2.1.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental baja

La estructura modelada con las propiedades de arcilla extruida (BAE) se aprecia en la Figura 52, a las 00:00 horas el muro oeste y la losa presentan en su superficie exterior una temperatura uniforme, mientras que el muro norte mantiene una temperatura menor ($-1.163\text{ }^{\circ}\text{C}$). En su superficie interior se aprecia que el muro oeste mantiene una temperatura mayor puesto que continua liberando el calor absorbido por la radiación proveniente del sol. Como se puede observar (ver Figura 53) a las 24:00 horas del análisis los muros norte y oeste interiores presentaron uniformidad de la temperatura, puesto que se concentró mayor absorción por la losa durante el día; En su exterior (ver Figura 53), se asume que el muro oeste se oponía al descenso de temperatura, interrumpiendo la conducción por los huecos de los bloques y debido a su valor mas bajo de conductividad térmica con respecto al modelo original, por otra parte el muro norte y la azotea manifiestan una temperatura uniforme.

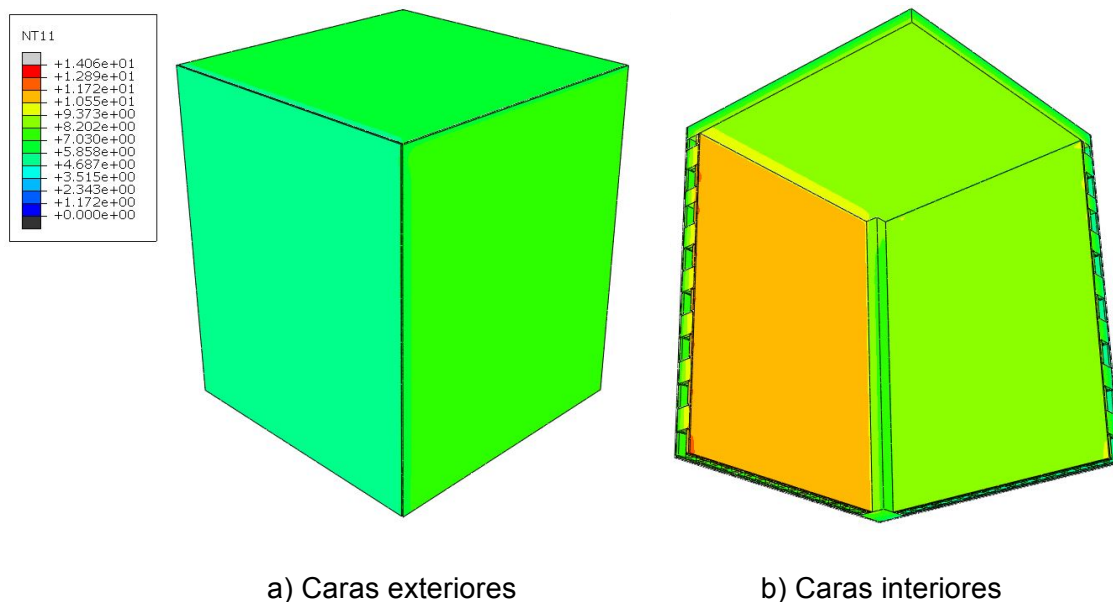


Figura 52. Distribución de la temperatura ambiental baja (00:00 hrs) ambas caras

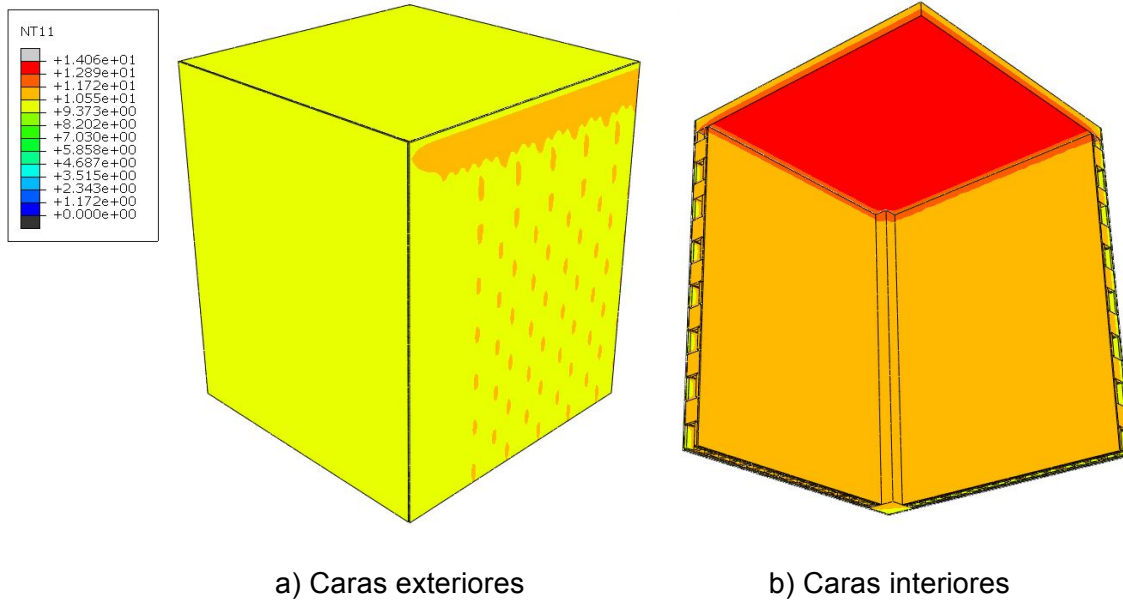


Figura 53. Distribución de la temperatura ambiental baja (24:00 hrs) ambas caras

4.2.2 Modelos de bloques de concreto ligero (BCL) Modelo 2

Debido a su alta comercialización en el estado de Nuevo León, se decidió utilizar para este trabajo bloques de concreto ligero, los cuales son modificados desde su matriz, cuyos materiales utilizados para sus agregados alteran y mejoran el comportamiento térmico aportando menor conductividad térmica y mayor porosidad en relación a las piezas de concreto tradicionales de dos o tres celdas.

4.2.2.1 Curvas de temperatura ambiental alta

El perfil de temperaturas del muro norte y oeste, no presenta una variación significativa con respecto al modelo original, como observa en la Figura 54, la temperatura de la losa y de los muros mantuvieron una tendencia similar, el muro oeste, alcanzó un pico máximo cercano al de la azotea, sin embargo se observó

una variación de tiempo entre ambos picos máximos, ya que las propiedades térmicas de esta pieza mejoran con el uso de agregados ligeros. Los picos máximos de las curvas se encuentran muy cercanos entre si, el pico máximo de la losa se presentó a 46.505 °C, mientras que el pico máximo del muro oeste fue de 46.245 °C. A pesar que las temperaturas no logran ser reducidas considerablemente, las curvas de los muros norte y oeste se presentan por debajo de la curva de la temperatura ambiental exterior en la mayor parte del análisis.

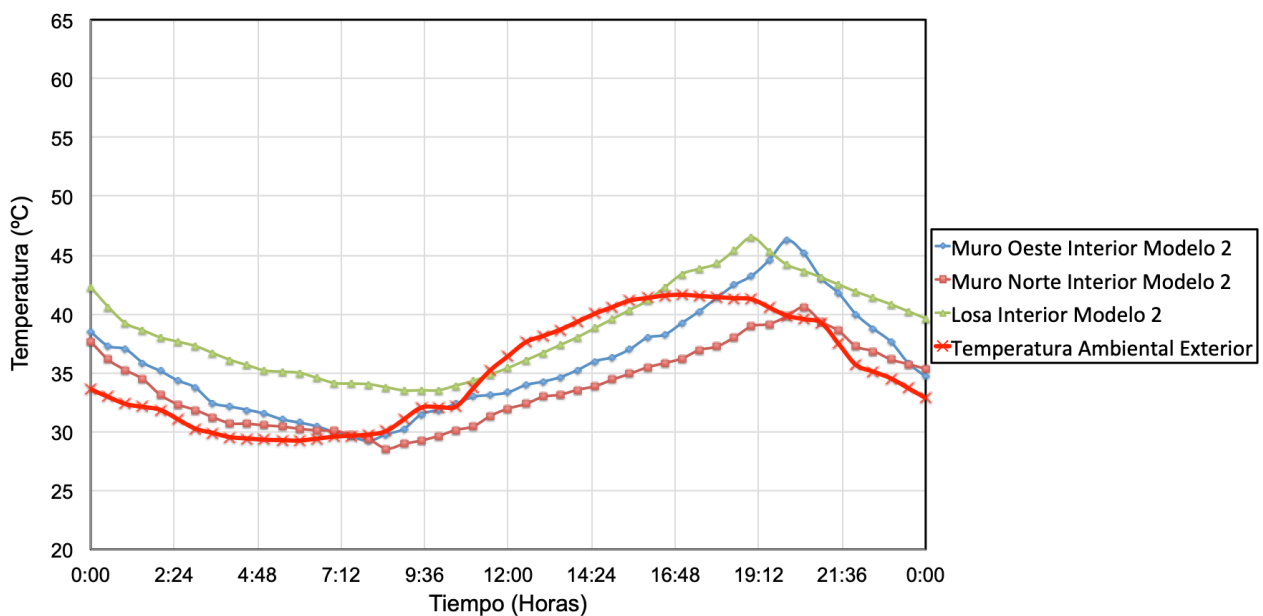


Figura 54. Curva de temperatura ambiental alta del Modelo 2

4.2.2.2 Curvas de temperatura ambiental baja

Las curvas presentadas en la Figura 55, muestran la evolución de las temperaturas del modelo 2, se puede observar que durante un periodo de 2 horas (10:00 a 12:00 horas) los elementos de muros y losa intentaban alcanzar el equilibrio térmico en su interior presentando +/- 1.00 °C de dispersión entre sus curvas; La curva del muro norte muestra una clara dispersión desde las 14:30

hasta 22:00 horas con respecto a las temperaturas de los otros dos elementos, debido a que la ubicación de este muro se mantiene oculto de la radiación directa del emitida por el sol, por ello, su enfriamiento o pérdida de calor fluctúa con mayor rapidez, el valor mínimo de temperatura se registró a las 16:30 horas con una magnitud de 7.039 °C en el muro norte.

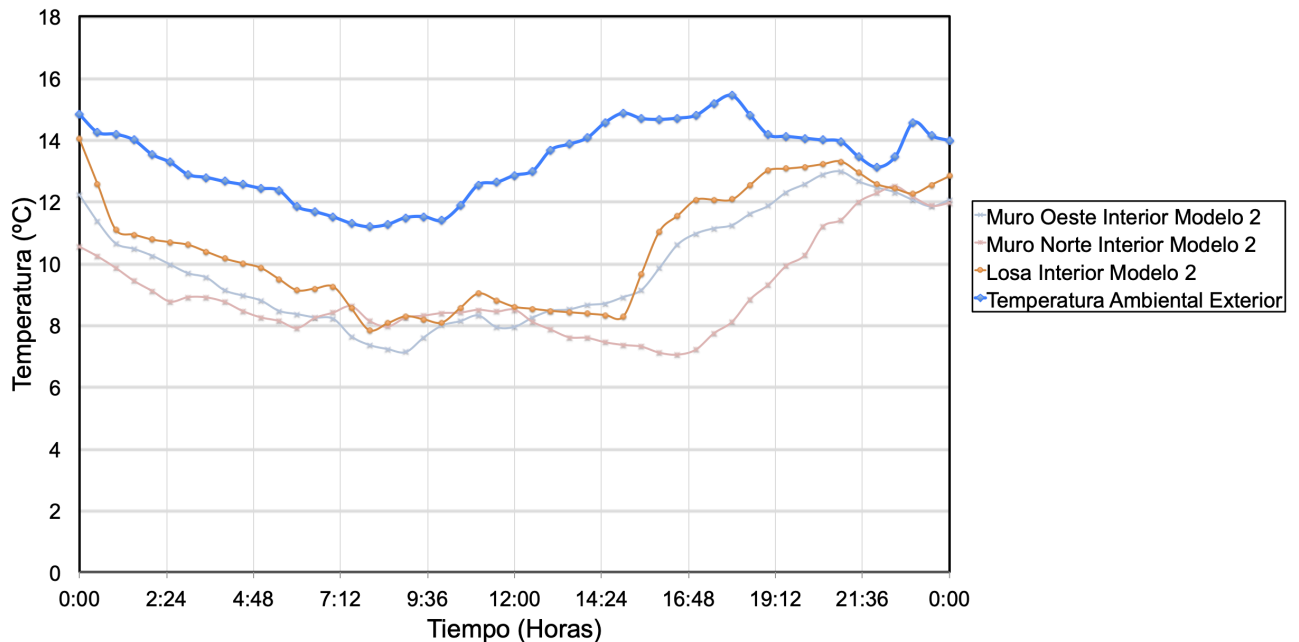


Figura 55. Curva de temperatura ambiental baja del Modelo 2

4.2.2.3 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental alta

En la Figura 56. se aprecia el comportamiento de la estructura modificada con de propiedades térmicas de bloques de concreto ligero (BCL), el comportamiento de este se asemeja al modelo original, debido a que los valores de las propiedades térmicas de este material se encuentran ligeramente por debajo de las del sistema original, sin embargo, se presentan temperaturas menores para las superficies interiores de los muros y azotea. En la superficie del muro norte exterior a las 00:00 horas, a diferencia de los modelos anteriores

presentó una mejor distribución con respecto a las otras superficies; Respecto a la temperatura interior en el mismo periodo de tiempo, la temperatura se manifestó con mayor velocidad en el muro oeste, ya que en el caso del modelo original, la radiación de los muros favoreció el cambio de temperatura de la azotea con una mayor difusión. En relación al desarrollo final de la estructura en el tiempo de 24 horas (ver Figura 57), las caras exteriores presentan un equilibrio térmico, mientras que en su interior el muro oeste y la losa se aprecia mayor temperatura que el muro norte (+0.469 °C); El modelo se comportó de manera similar al original, siendo la variante el decremento de la temperatura de 3.00 °C en promedio durante todo el periodo de análisis.

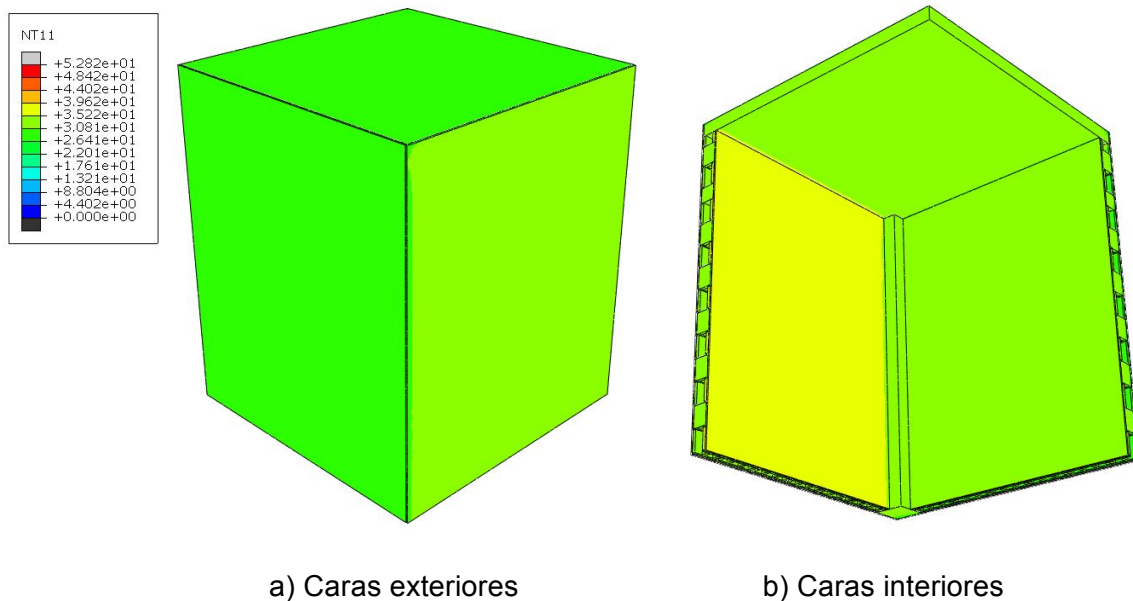


Figura 56. Distribución de la temperatura ambiental alta (00:00 hrs) ambas caras

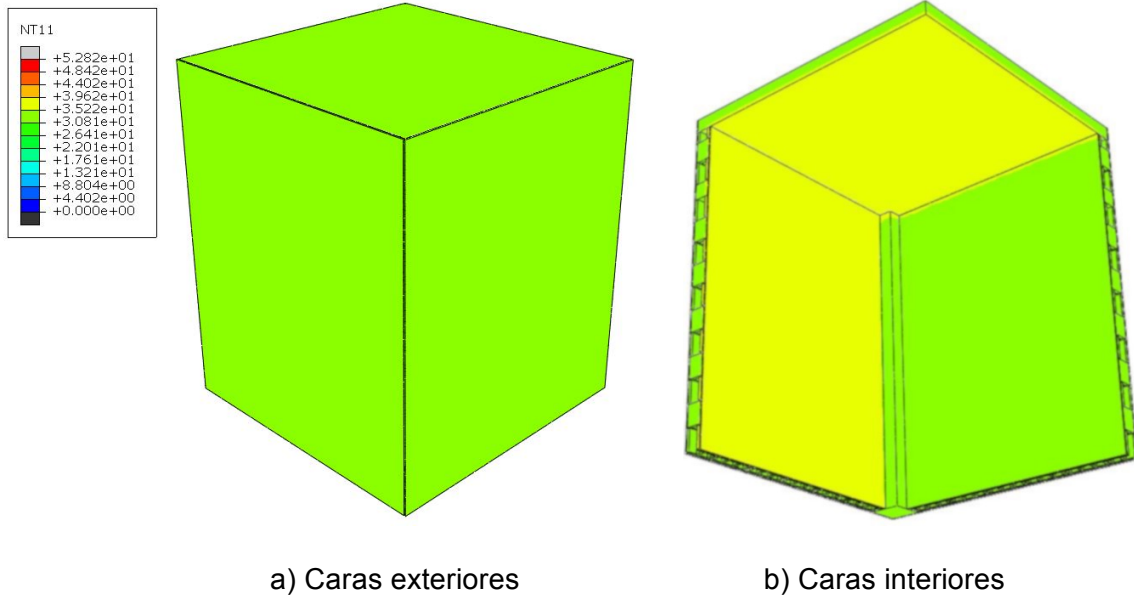


Figura 57. Distribución de la temperatura ambiental alta (24:00 hrs) ambas caras

4.2.2.4 Mapas de contorno del modelo de la temperatura ambiental baja

En la Figura 58, se expone el desempeño térmico del modelo computacional que representa a la estructura desarrollada con bloques de concreto ligero, los modelos que representan las 00:00 horas tuvieron un incremento de 1.00 a 1.50 °C en las superficies internas; Las superficies exteriores del muro oeste y losa mantienen una temperatura uniforme, el muro norte presenta menor temperatura (-1.163 °C), mientras que en su interior el muro oeste intenta lograr equilibrio térmico con respecto a las otras superficies. También se asume que los muros presentaron mayor resistencia al cambio de temperatura cuando estos están en contacto con elementos de concreto estructural. Respecto a los modelos finales de 24:00 horas, el muro oeste se opone al cambio de temperatura con mayor fuerza que los otros elementos, (ver Figura 59 a), por otra parte en el interior de la estructura la losa libera el calor adquirido durante el día intentando alcanzar el

balance térmico con los otros dos elementos, además, se puede apreciar que los elementos de concreto (losa y dala de cerramiento) muestran un comportamiento semejante donde mantienen mayor temperatura que el resto de la estructura.

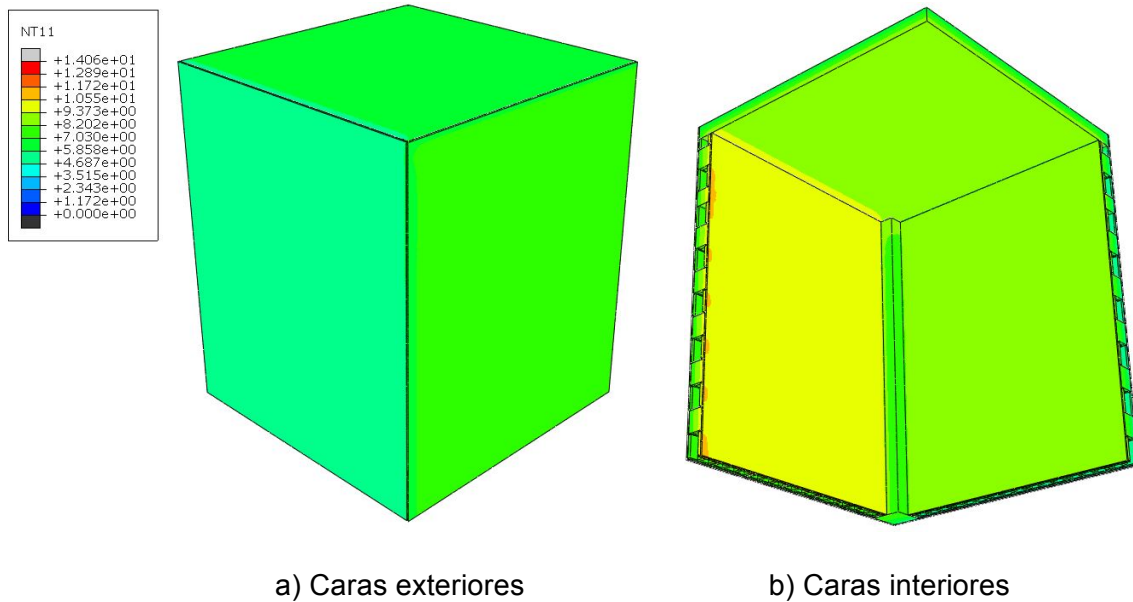


Figura 58. Distribución de la temperatura ambiental baja (00:00 hrs) ambas caras

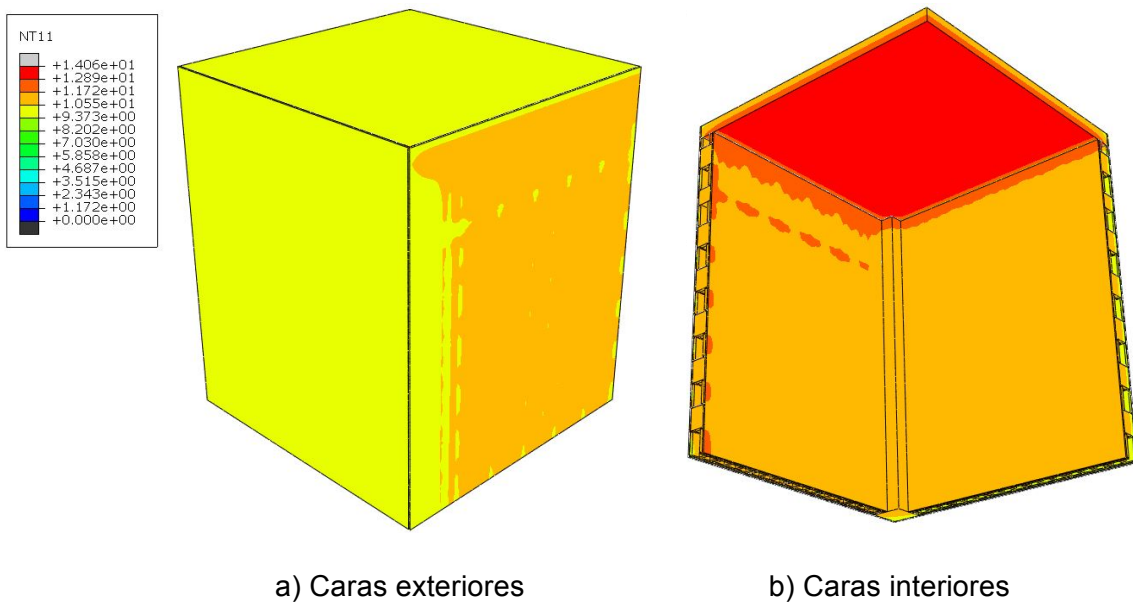


Figura 59. Distribución de la temperatura ambiental baja (24:00 hrs) ambas caras

4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Los resultados obtenidos mediante la medición de campo y el modelo computacional elaborado en el software Abaqus CAE presentan errores relativos menores del 10 %, calculados mediante la Ec. 25, esto se consiguió a través de un proceso detallado de calibración en el mallado y un conjunto de estudios paramétricos con el fin de deducir las propiedades adecuadas de los materiales.

$$\frac{\text{Resultados obtenidos en campo} - \text{Resultados del modelo computacional}}{\text{Resultados del modelo computacional}} = \text{Error relativo (\%)} \quad (25)$$

En las Figura 60 y 61, se muestran las curvas de los tipos de elementos finitos utilizados y la proximidad que tiene cada uno con los valores obtenidos de campo, los tres tipos de elementos son ser consistentes, sin embargo, para la elección del elemento finito indicado, se consideró la dispersión existente entre los valores obtenidos del modelo computacional y los obtenidos en campo, además del tiempo de horas maquina. En base a estos resultados, mediante la observación y análisis del coeficiente de determinación se resume lo siguiente (ver Tabla 17):

Tabla 17. Tipo de elemento finito vs tiempo de análisis

Dimensión de elementos finitos con incrementos 0.1x	Tiempo de análisis (Horas)	Coeficiente de determinación (R²)
DC3D8	23:00	0.9917
DC3D4	11:00	0.9908
DC3D10	168:00	0.9879

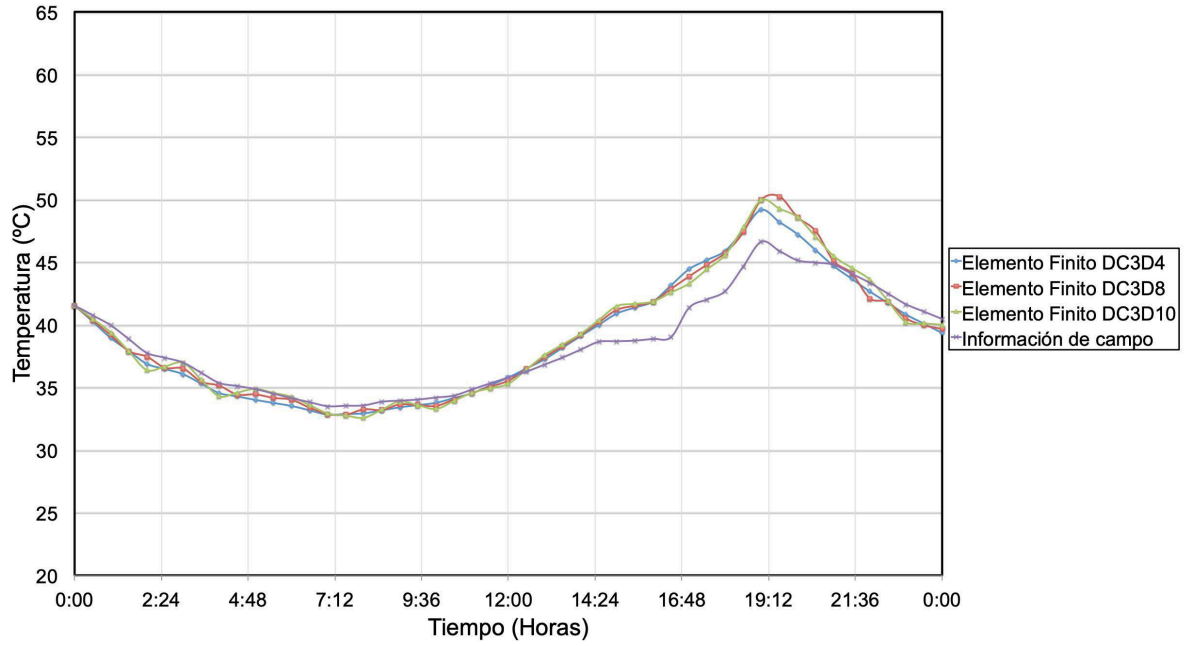


Figura 60. Curvas de calibración del mallado según el tipo de elemento finito (temperatura ambiental alta)

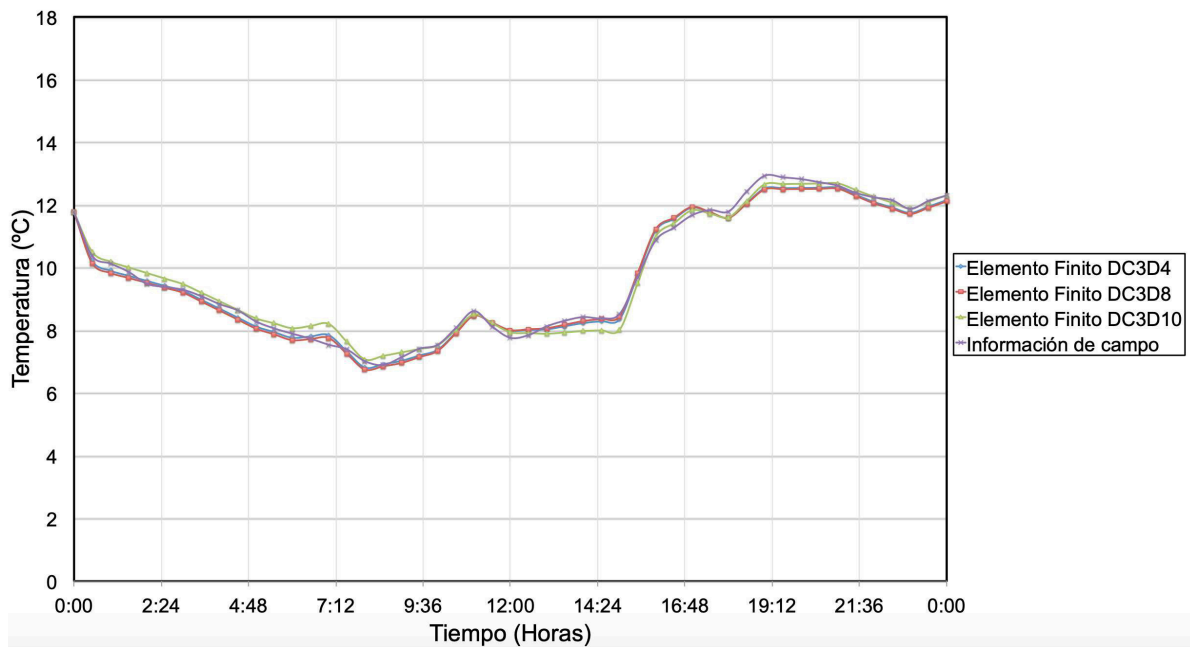


Figura 61. Curvas de calibración del mallado según el tipo de elemento finito (temperatura ambiental baja)

Es importante mencionar que mientras mayor sea el numero de nodos del elemento, mayor será el numero de funciones base, por lo tanto, contará con un mayor espacio funcional para resolver las ecuaciones, sin embargo, a pesar de que los elementos DC3D10 cuentan con mayor numero de nodos, a través de las curvas y mediante el coeficiente de determinación (R^2) calculado en la Tabla 17, se destaca que los elementos DC3D4 se ajustan mejor a los datos de campo de este trabajo, donde se evalúan únicamente las temperaturas nodales, además de ser aproximadamente 15 veces mas rápido el análisis con respecto a los elementos tetraedros DC3D10 y aproximadamente 2 veces mas rápido con respecto a los elementos hexaedros CD3D8.

4.3.1 Validación de resultados del modelo computacional vs datos de lectura de campo (temperatura ambiental alta)

Se presenta en la Figura 62 la comparativa de los resultados obtenidos mediante el modelo computacional y los datos obtenidos de la lectura de campo, se observa una gran similitud entre los perfiles, se puede apreciar una mayor dispersión en los puntos donde la curva de temperatura de la estructura forma un pico máximo, presentando un error relativo máximo del 9.02 % ubicado en el muro oeste de la estructura.

La curva del muro norte del modelo computacional, no coincide con la temperatura del modelo real, debido a que cuando existe un cambio abrupto en la curva de temperatura, el software Abaqus tiene dificultad para predecir este comportamiento.(Qian, 2016); En general, el conjunto de curvas obtenidas del modelo computacional presentan un comportamiento equivalente a las curvas del modelo real.

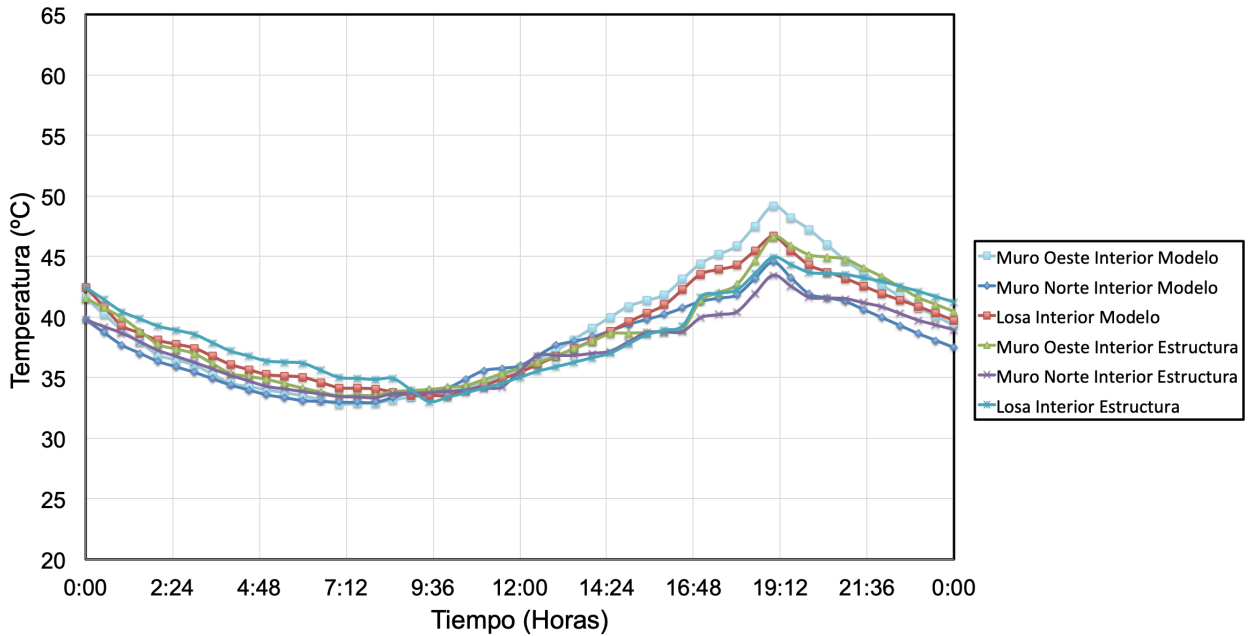


Figura 62 Curvas de temperatura del modelo computacional vs estructura real en temperatura ambiental alta

4.3.2 Validación de resultados del modelo computacional vs datos de lectura de campo (temperatura ambiental baja)

La Figura 63 muestra la comparación las curvas de temperatura en la estructura sometida a temperatura ambiental baja y las curvas de temperatura obtenidas de datos de campo; Se observa que los datos de salida del software Abaqus CAE son muy aproximados a los datos de lectura, presentando un error relativo máximo de 6.03 %, la dispersión entre las curvas se encuentra alrededor del orden de 0.70 °C como máximo entre los tres nodos evaluados. En relación a los porcentajes de error relativo para ambos casos de estudio, estos se consideran aceptables, tomando en cuenta que existen parámetros naturales de un ambiente no controlado, como la velocidad del viento, la humedad relativa del ambiente y el porcentaje de humedad (contenido de agua) los cuales afectan directamente el proceso de transferencia de calor, debido a que son valores que alteran las

variables establecidas en los modelos matemáticos. En resumen, cada curva obtenida por el modelo computacional mostró seguir el mismo comportamiento que su correspondiente curva obtenida con valores de campo.

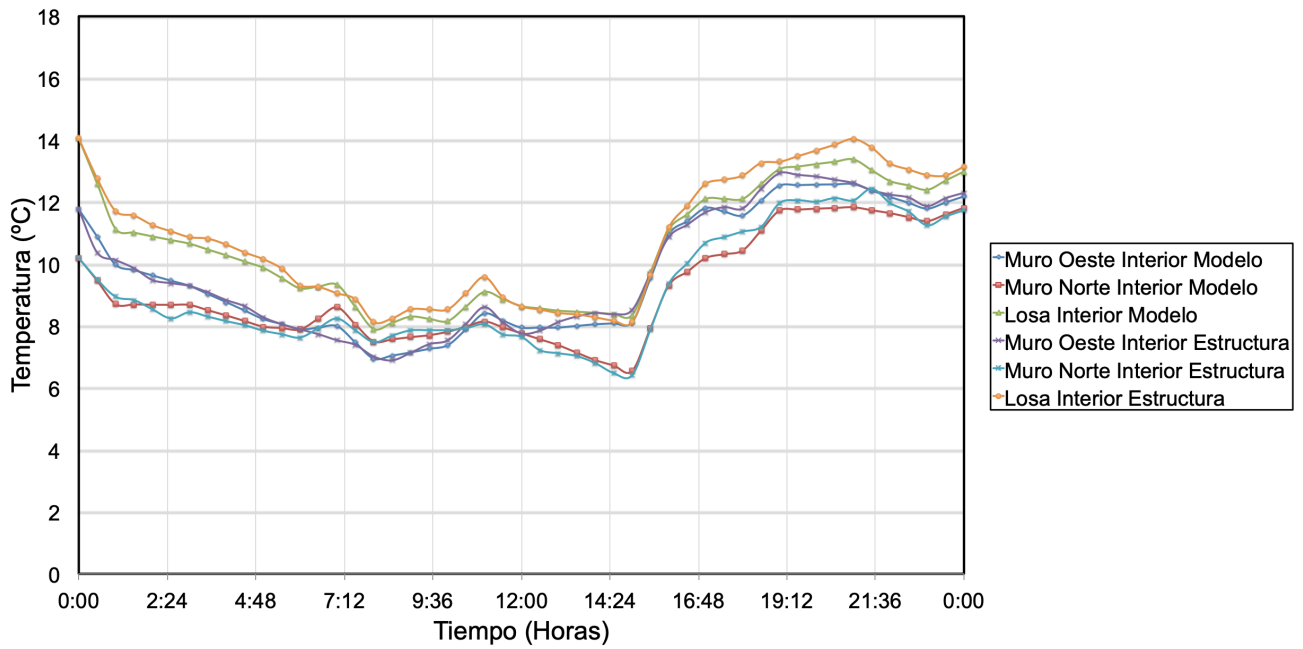


Figura 63 Curvas de temperatura del modelo computacional vs estructura real en temperatura ambiental baja

4.3.3 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados investigaciones similares (temperatura ambiental alta).

Al evaluar estructuras formadas por bloques a temperatura ambiente alta se han encontrado resultados similares a este trabajo, en la Figura 64 se observa que las curvas de resultados reportadas por Al-Hazmy (2006) y las de este trabajo comparten un comportamiento semejante, las temperaturas ambiente de ambos trabajos registran temperaturas por encima de los 40 °C, mientras que las temperaturas superficiales alrededor de los 60 °C (+/- 1.00 °C), sin embargo existe un desfase entre los picos de temperaturas de ambos trabajos, tanto el de temperatura ambiente como el de la temperatura superficial, debido a la ubicación

geográfica de dichas investigaciones (Jeddah 21°32'36"N 39°10'22"E y San Nicolás 25°45'00"N 100°17'00"O). Por otra parte los resultados reportados por Xamán (2017) presentan una curva de temperatura ambiental exterior con mayores valores alcanzando los 45 °C y la temperatura superficial se aproxima a 73 °C, la diferencia de estos valores contra los de este trabajo se basa en el tipo de elemento evaluado y el ángulo de recepción de radiación solar. La curva de temperatura en la superficie interior (Xamán, 2017) se encuentra por debajo de la temperatura ambiental en todo momento, contrario a esta investigación donde la curva de temperatura de superficie interior sobrepasa la temperatura ambiental exterior en mas del 90% del tiempo.

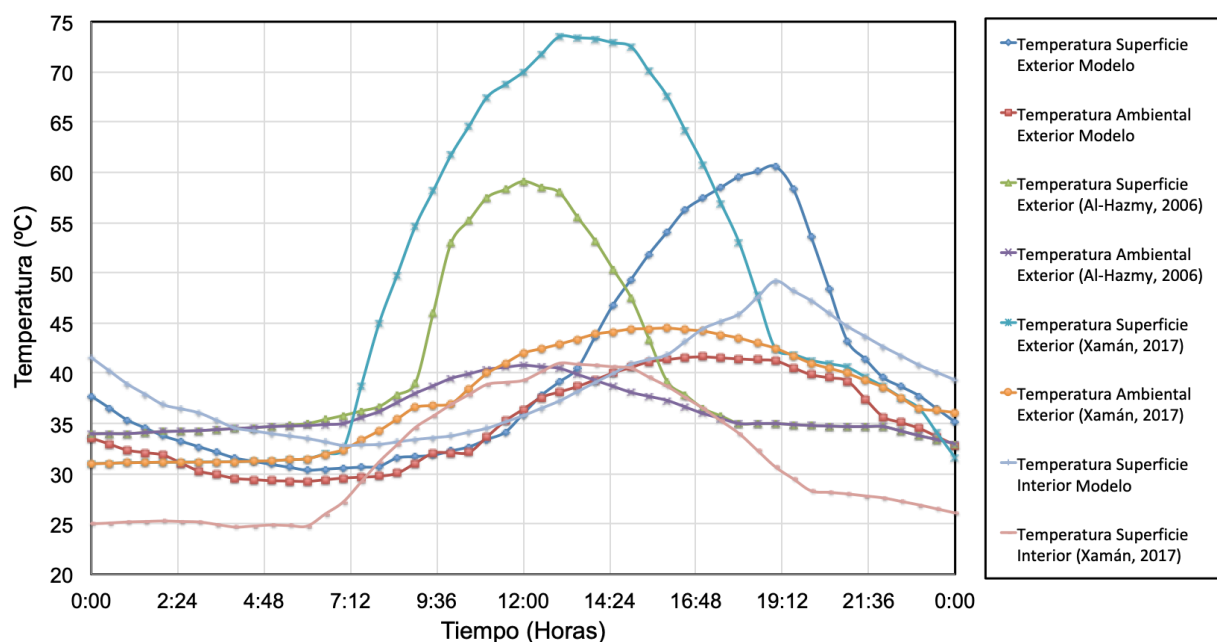


Figura 64 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental alta)

Mediante la visualización de las curvas obtenidas de la experimentación y la modelación de la estructura, es evidente que los elementos y materiales utilizados para la construcción del espécimen no cumplen con la normativa para el aislamiento térmico NMX-C-460-ONNCCE (ONNCCE, 2013), donde los elementos estructurales tipo muro deben tener un valor mínimo de 1.00 m²K/W (Resistencia térmica) y la losa de 1.40 m²K/W, mientras que los muros y losa del espécimen rondan del orden de 0.22 m²K/W y 0.05 m²K/W respectivamente, por lo tanto la baja resistencia que tienen ante la carga térmica se traduce directamente en un alto flujo de calor, el cual se manifiesta en temperaturas fuera de la zona del confort térmico, tomando como referencia los estudios de Borbón (2010) y Pérez (2011) donde se obtuvo un valor promedio de 0.18 m²K/W de resistencia térmica en los muros, se afirma que los valores obtenidos de este trabajo se encuentran dentro de un orden similar, sin embargo cuenta con 0.04 unidades más (ver Tabla 18), debido a que la estructura que se estudió en este trabajo se trató de un sistema compuesto por multicapas (Recubrimiento de mortero cemento-arena, piezas de mampostería y recubrimiento de yeso).

Tabla 18. Comparación de resultados teóricos de resistencia térmica para bloques (15cm)

Investigación	Resistencia Térmica (m²K/W)
Borbón (2010)	0.171
Ossama (1994)	0.331
Trabajo actual	0.22

4.3.4 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados investigaciones similares (temperatura ambiental baja).

En esta sección se comparan las curvas obtenidas mediante el modelo computacional cuyos valores representan la temperatura superficial del interior y exterior de la losa contra el trabajo realizado por Xamán (2017).

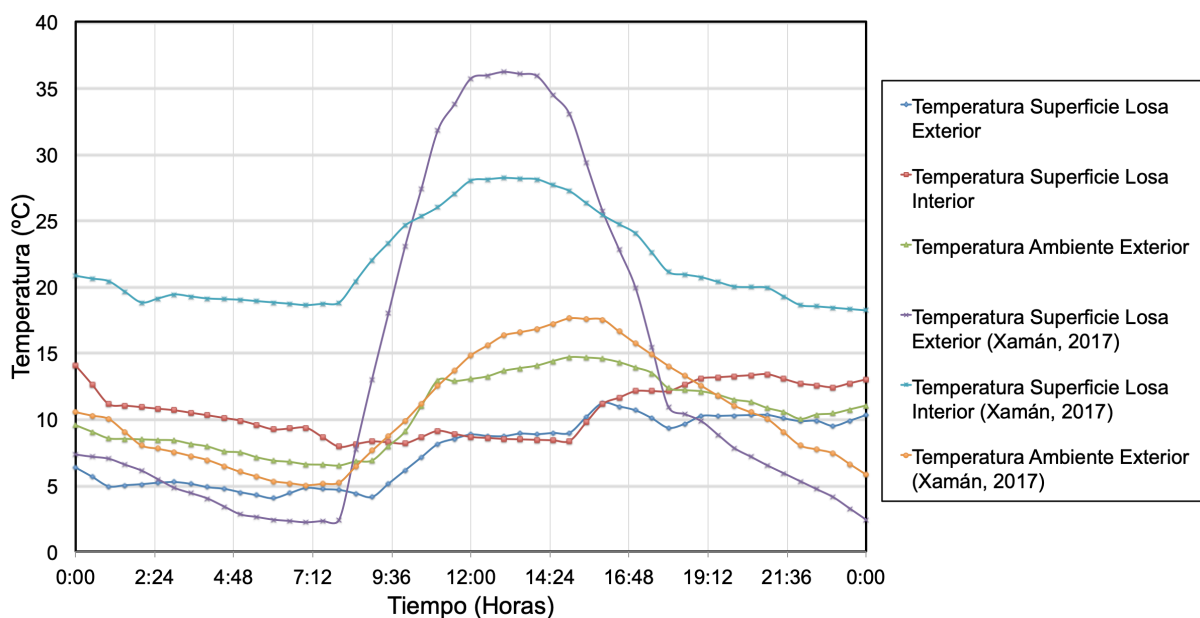


Figura 65 Validación de resultados del modelo computacional vs resultados de investigaciones similares (temperatura ambiental alta)

En la Figura 65 se puede apreciar las diferencias entre las curvas temperatura-tiempo de ambos trabajos, al comparar estas curvas se observa que, las curvas de temperatura ambiente tienen una importante dispersión entre ellas, sin embargo, tienen un comportamiento semejante en su forma, la curva obtenida del trabajo actual reporta un valor máximo de 14.67 °C, mientras que la curva obtenida por Xamán registra 17.60 °C, con respecto a las curvas de temperaturas superficiales se puede observar una tendencia distinta por ambos conjuntos,

mientras que las curvas obtenidas por Xamán (2017) presentan una tendencia a su curva de temperatura ambiental exterior, las curvas obtenidas en este trabajo no reflejan ese comportamiento, esto podría deberse a la dirección y cantidad de recepción solar que la losa adquiere durante el análisis, además, en las curvas del trabajo realizado por Xamán el elemento evaluado incrementó rápidamente su temperatura, alcanzando un valor máximo en la superficie exterior de 36.20 °C e interior de 28.15 °C, por otra parte el elemento de este trabajo reportó 11.12 °C en su exterior e interior 14.60 °C. La temperatura mínima registrada por Xamán y en este trabajo se encuentran en la superficie interior de la losa con 18.20 y 8.35 °C respectivamente.

Cabe resaltar que la escasa de investigación existente de esta línea limita la comparación de resultados, puesto que un gran porcentaje de investigaciones se encuentran mas enfocadas al problema de temperaturas ambientales altas.

4.3.5 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 1 (temperatura ambiental alta)

En la figura 66 se muestra el comportamiento de las curvas de temperatura-tiempo obtenidas en campo, del modelo computacional original y el modelo computacional con bloques de arcilla (Modelo 1), se muestra una temperatura máxima de modelo computacional de 49.17 °C (19:00 horas), mientras que en el Modelo 1 se registró un valor máximo de 42.35 °C (21:00 horas), ambos valores fueron registrados en el Muro Oeste de la estructura, el modelo desarrollado con bloques de arcilla extruida presenta un retraso de tiempo para valores máximos de 02:00 horas. A pesar de que el Modelo 1 conserva la misma tendencia de las

curvas del Modelo original el desempeño con bloques de arcilla mejora en un 13.87 % con respecto a la configuración original ante temperaturas altas, esto se debe a que tiene propiedades térmicas mas eficientes que los bloques de cemento arena.

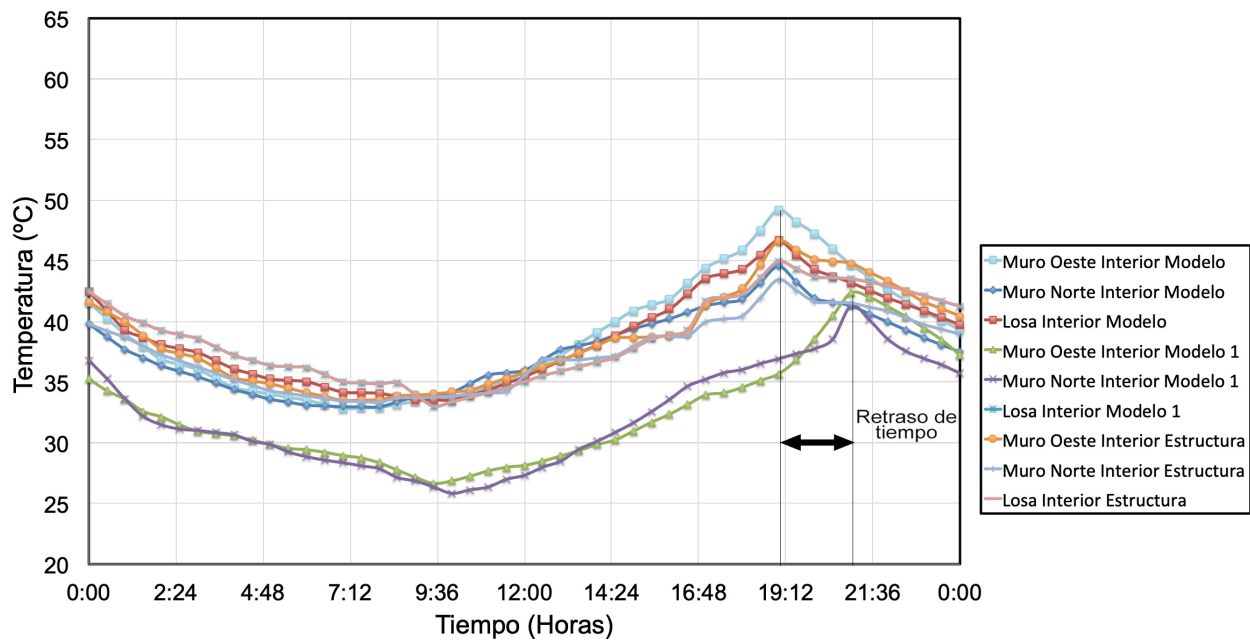


Figura 66. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 1 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental alta)

4.3.6 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 1 (temperatura ambiental baja)

La Figura 67 muestra la conducta de las curvas establecidas en 4.3.5 ante las temperaturas ambiente bajas, se puede apreciar que las curvas del Modelo 1 tienen un comportamiento semejante a sus similares del Modelo original; El modelo computacional registró un valor mínimo de 6.94 °C (08:00 horas), mientras que el Modelo 1 reportó 7.83 °C como temperatura mínima, lo cual representa mejor disipación de calor hacia el interior de la estructura, también se observa un

retraso de tiempo 01:30 horas entre sus picos mas bajos de temperatura, ubicados en el Muro Oeste de ambos modelos, además, el Modelo 1 presenta un mejor desempeño térmico con valor de 12.82 % en relación al modelo original ante temperaturas bajas.

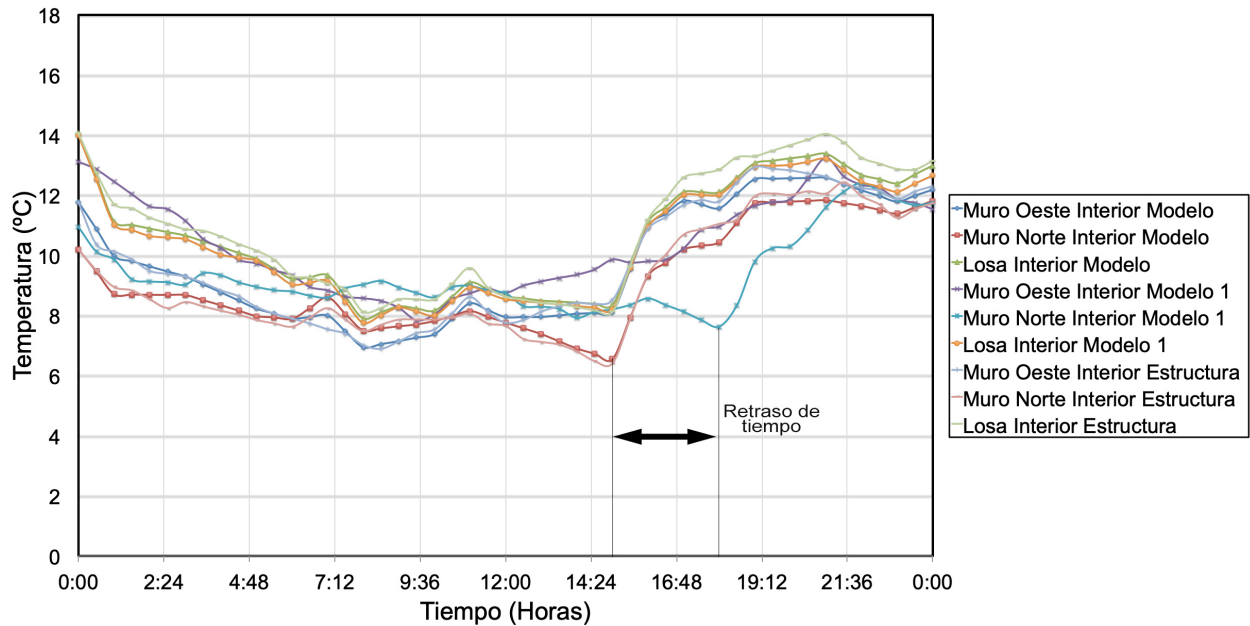


Figura 67. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 1 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental baja)

4.3.7 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 2 (temperatura ambiental alta)

Se muestra en la Figura 68 las curvas de temperatura-tiempo que representan el comportamiento térmico de la estructura original vs el modelo elaborado de bloques de concreto ligero (Modelo 2), este modelo presentó una temperatura máxima de 46.24 °C (20:00 horas), registrando un retraso temporal de 01:00 hora para valores máximos de temperatura con respecto a la

temperatura máxima del Modelo original; no obstante y a pesar que las curvas del Modelo 2 siguen la tendencia, forma de curva y se encuentran cerca de las curvas del Modelo original, los bloques de concreto ligero reportan un mejor desempeño térmico con valor 5.96 % ante la presencia de temperaturas altas.

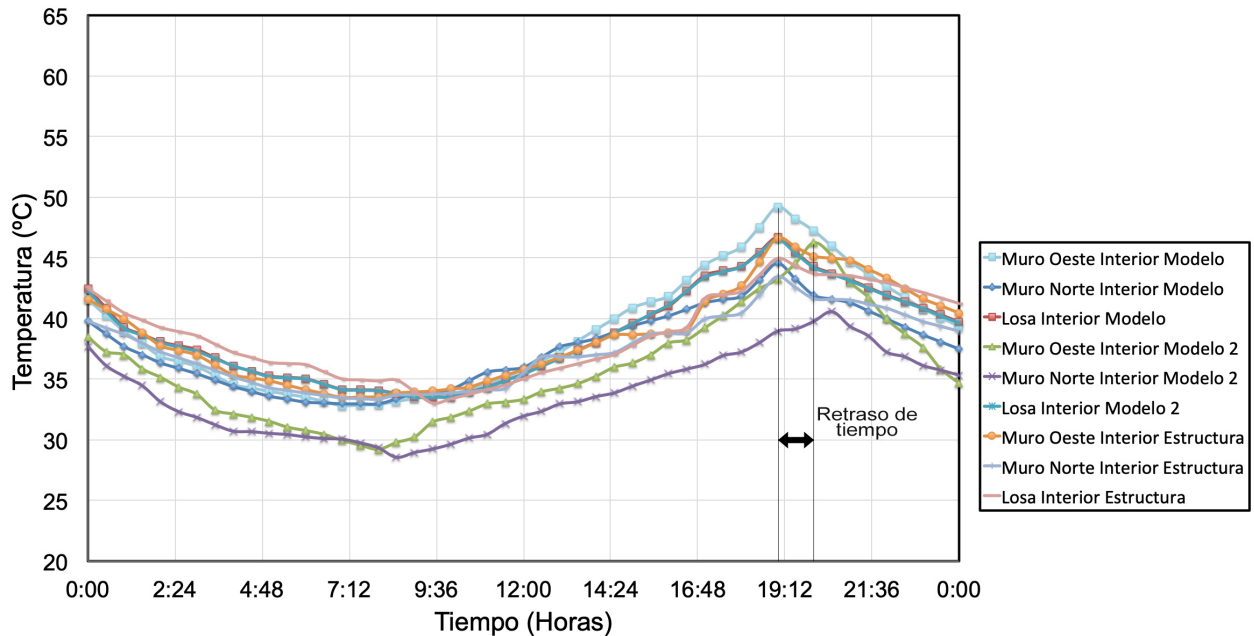


Figura 68. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 2 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental alta)

4.3.8 Comparativa de resultados del modelo computacional y datos de campo vs Modelo 2 (temperatura ambiental baja)

En la Figura 69 se observan las curvas de temperatura de las configuraciones de los modelos original y computacional vs el Modelo 2 ante las temperaturas ambiente bajas, presentando este último una temperatura mínima de 7.12 °C (09:00 horas); Se registró un retraso de tiempo de 01:00 hora entre los valores mas bajos de temperaturas por configuración. Este Modelo 2 registró un

porcentaje mayor de desempeño con valor de 2.89 % con respecto al desempeño de la configuración original ante las temperaturas bajas.

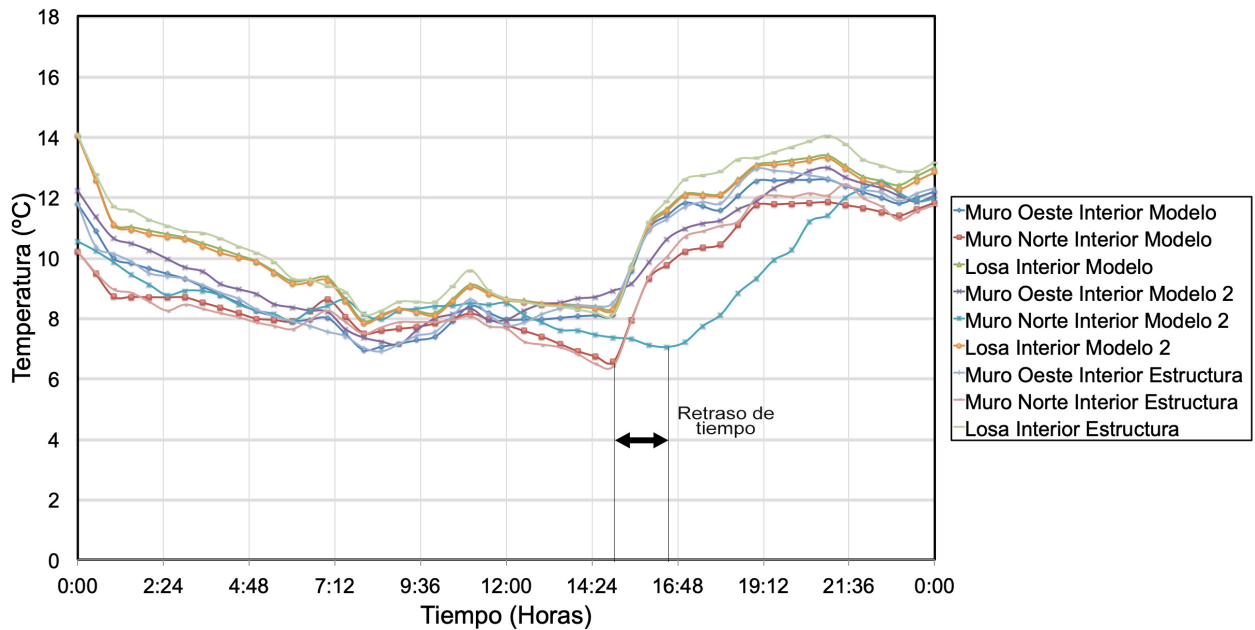


Figura 69. Curvas comparativas de resultados del modelo computacional vs Modelo 2 vs datos obtenidos en campo (temperatura ambiental baja)

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación sobre el comportamiento térmico de la estructura, las observaciones más relevantes y recomendaciones para trabajos futuros.

A lo largo de esta investigación se estudió la transferencia de calor a través de sus tres mecanismos, con el fin de ilustrar como ocurre la difusión del calor en una estructura que fue considerada como típica en la zona norte del país (Xamán, 2017), buscando aportar una visión enfocada hacia una mejor selección de los elementos para la construcción

USO DE LA MECÁNICA COMPUTACIONAL

El uso de la tecnología en nuestro tiempo favorece sustancialmente la investigación y la aportación de la ciencia en este y muchos ámbitos mas; En este trabajo se concluye que el uso del método de los elementos finitos es una técnica que reproduce con una mejor aproximación la transferencia de calor en sólidos.

Con esta herramienta es posible realizar una gran cantidad de análisis de

casos de ramas de la ingeniería, sin generar gran impacto en los recursos económicos y de tiempo en comparación a estudios experimentales, sin embargo, cada ensayo, prueba o recopilación de información experimental es indispensable e insustituible para la ciencia.

OBTENCIÓN DE DATOS EN CAMPO

Se registraron temperaturas ambientales durante el verano por encima de los 40 °C y durante la temporada invernal mínimas de 6 °C, temperaturas que año con año se presentan y que circunstancialmente avalado por estudios serán mas frecuentes. Este efecto causa una alteración inminente de las temperaturas en las estructuras, las temperaturas superficiales superan ampliamente a las temperaturas ambientales, puesto que los materiales utilizados en la construcción tradicional no presentan propiedades térmicas más eficientes, por ello, las estructuras sufren un desequilibrio térmico, presentando por lapsos de tiempo que la temperatura ambiental interna se aleje de los índices de confort térmico

Para la lectura de datos, se recomienda tomar la mayor cantidad de puntos posibles y registrar en intervalos mas pequeños (entre 15:00 a 19:00 horas) la toma de datos durante la temporada de verano, ya que se presentan los mayores valores de temperatura con cambios repentinamente abruptos y para el invierno, este no es un punto a considerar, las curvas de temperatura tienden a tener poca amplitud con gradientes térmicos no mayores a los 10 °C de temperatura

Se recomienda:

- a. Tener especial cuidado en la fijación de dispositivos lectores de temperatura sobre la superficie, evitando que el producto adhesivo o sujetador se encuentre en contacto directo con los metales del termopar, ya que es posible que este elemento sujetador adquiera mayor temperatura que la superficie de la estructura y esta sea la temperatura registrada por el equipo recopilador.
- b. Visualizar la localización de la estructura, las zonas o superficies de mayor influencia o mayor contacto con la radiación solar y la presencia del viento, estos dos factores afectan el aumento potencial de las temperaturas superficiales y los coeficientes de convección respectivamente.
- c. Realizar la mayor cantidad de lecturas de datos posibles, es decir localizar periódicamente cuándo se presentarán las temperaturas que interesan para la investigación, esto puede cambiar de un instante a otro, por lo tanto es importante contar con una población más amplia de datos y escoger los valores mas críticos para alimentar modelo, también es relevante la selección de días donde la presencia de lluvias sea nula.
- d. Desarrollar la lectura de datos en el día intermedio del conjunto de días con temperaturas mas bajas o mas altas, puesto que la masa térmica de la estructura se equilibre y en consecuencia la temperatura interna.
- e. Si la toma de temperaturas de campo registra curvas con cambios abruptos de pendiente, incrementar el numero de puntos para “suavizar” la curva, así, el software predecirá resultados mas precisos.

MODELO TÉRMICO

Los modelos computacionales que se desarrollaron en esta investigación, son diferentes a los modelos típicos que la mayoría de autores e instituciones han desarrollado, debido a que el comportamiento y la difusión del calor no es similar cuando se estudia una pieza, pila o murete comparado como cuando se estudia una porción o una estructura completa.

El análisis del modelo computacional, consideró los tres mecanismos de transferencia de calor, un proceso complejo de calibrar, debido a que existen muchos valores que pueden ser modificables; Para la obtención de la menor dispersión de datos entre el modelo físico y el modelo computacional, los parámetros que tienen mayor influencia son: la densidad del material, la conductividad térmica y el calor específico, por lo tanto estos tres parámetros fueron clave para la validación de los resultados (Remesar, 2017).

Abaqus CAE es un software poderoso, capaz de realizar análisis y resolver problemas complejos, obteniendo resultados en una cantidad finita de puntos posicionados según se deseé, sin embargo debido a las limitaciones de tiempo y equipo se llega a las siguientes conclusiones:

La elección del tipo correcto de elemento finito es crucial y determinante en la aproximación de los resultados, en la búsqueda del tiempo de horas maquina, se concluye que los resultados con elementos DC3D4 son tan aproximados como el uso de elementos DC3D10 para análisis del tipo Transferencia de Calor (Heat Transfer), entre los cuales existe una amplia diferencia en horas de análisis.

Si la conductividad de los elementos aumenta, la resistencia a la

transferencia de calor sufre un decremento importante, la fluctuación del calor se genera mas rápido, sin embargo esto no determina la temperatura final sino la velocidad con la que el calor se transfiere. Se ha reportado que el aumento de temperatura incrementará el valor de la conductividad térmica, sin embargo para esta investigación las temperaturas registradas no contribuyen a este fenómeno (Kook-Han, 2003).

La presencia de los huecos en los bloques contribuye a que exista un retardo de la difusión del calor, debido a que los espacios huecos de las piezas de mampostería interrumpen el proceso de transferencia por conducción, no obstante, según la literatura, el aire puede ser modelado como un sólido con una conductividad térmica de 0.026 W/mK (Alghamdi *et al*, 2017), sin embargo, generaría un gran numero de interacciones entre sólidos.

Aunque la aportación del mortero a la mampostería constituye aproximadamente menos del 10 % por unidad de metro cuadrado, este material incrementa significativamente la difusión del calor en la estructura, aumentando cerca de un 31 % el flujo de calor y la temperatura (+/- 0.50 °C) en las zonas de las juntas (Al-Hadhrani, 2006) tal como se muestra en las Figura 70 y 71.

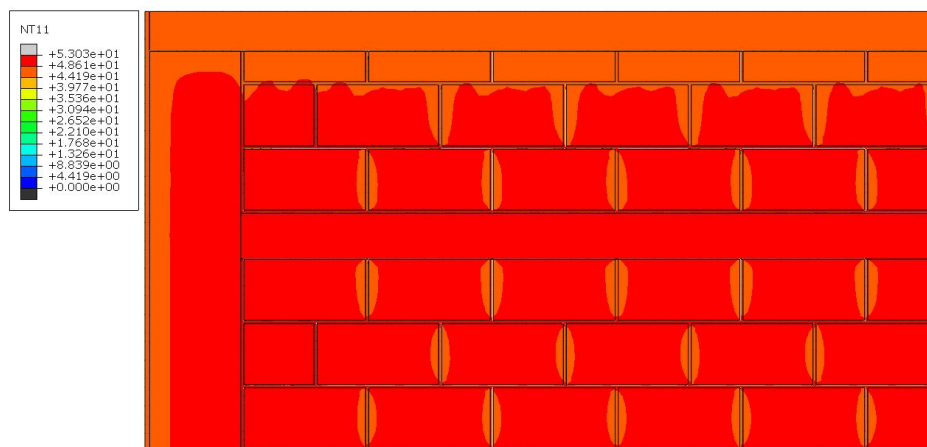


Figura 70. Distribución del calor en estructura de mampostería ante temperaturas altas

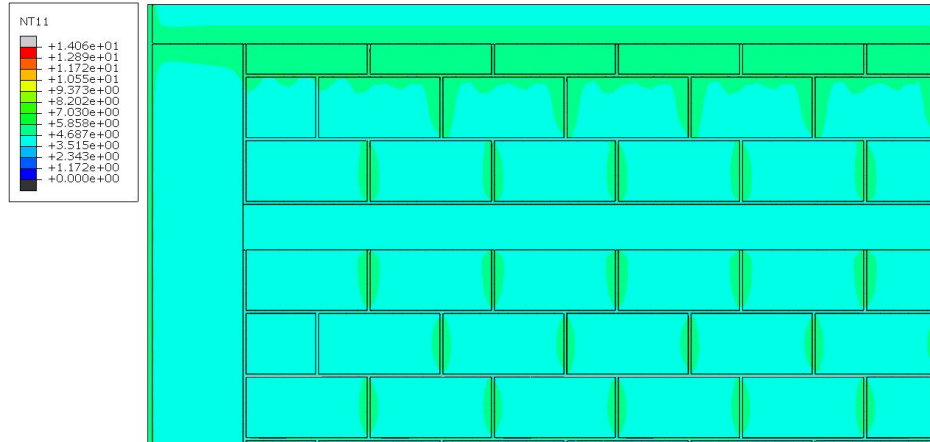


Figura 71. Distribución del calor en estructura de mampostería ante temperaturas bajas

El 42.6% de calor transferido hacia el interior de la estructura, se transportó por el elemento tipo losa (ver Figura 72), debido a dos factores importantes:

- a. Representa un gran volumen de material con respecto a los muros, por lo tanto, mayor conservación de energía
- b. Las propiedades termo-físicas son menos favorables que las de los muros de mampostería, por lo que se recomienda lo siguiente: el aislamiento de la losa representaría significativamente una reducción a la cantidad de calor transferido, naturalmente un mejor balance térmico para la estructura.

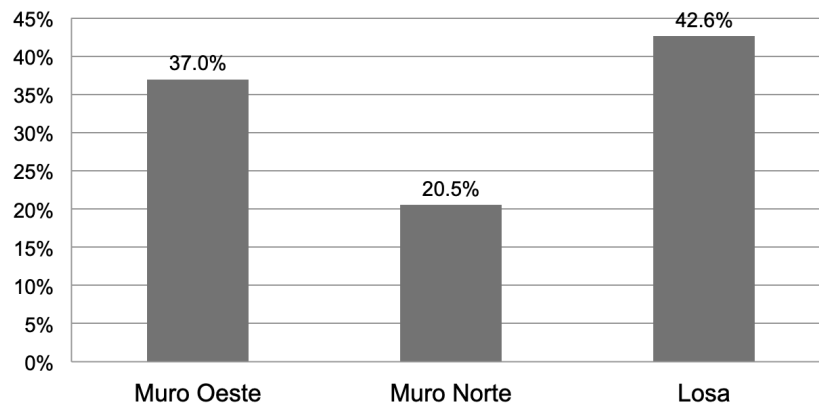


Figura 72. Porcentaje de aportación de calor hacia el interior de la estructura

La baja densidad de los elementos puede favorecer a que el calor se difunda con menor velocidad, sin embargo, se debe tener especial atención en que los huecos rellenos de aire no se encuentren conectados entre si, evitando la presencia de humedad en los poros “Humedad=Agua=Mayor conductividad térmica” (Biseniece et al., 2017).

Los sistemas compuestos, es decir los recubrimientos (mortero y yeso) aplicados en las construcciones son utilizados en esta zona del país, además de aportar una protección a la intemperie, favorecen el retardo en la difusión del calor, por lo tanto es recomendable su aplicación sobre la estructura de mampostería.

En la temporada invernal se presenta un comportamiento térmico mas estable de la estructura en general, mientras que durante la temporada del verano, existen gradientes térmicos importantes que deben ser considerados, eso se traduce a un alto uso de sistemas mecánicos de enfriamiento y gran consumo de energía eléctrica, por ello, es recomendable un estudio de factibilidad costo/beneficio para determinar la cantidad necesaria y la ubicación de elementos con propiedades térmicas más eficientes.

USO DE PIEZAS CONVENCIONALES DE LA REGIÓN

Mediante el análisis las gráficas presentadas en el capítulo 4 se llega a las siguiente conclusiones:

El modelo computacional que mostró mejor desempeño térmico fue el desarrollado con bloques de arcilla extruida, debido a que sus propiedades

térmicas presentan una mejor respuesta ante la exposición de temperaturas ambientales extremas respecto a las otras piezas; Se pudo observar que además de la reducción de las temperaturas durante el verano y la conservación de un perfil mas estable durante la temporada de invierno, se presentó un retraso de tiempo significativo respecto a la configuración original de BCL (Modelo 2) y BCA (Modelo original) respectivamente, estos retardos influyen poderosamente en la cantidad de horas de operación que se traduce en una mayor reducción de los sistemas de enfriamiento y calefacción. Se observó que durante el día mas frío, la diferencia entre temperaturas del sistema mas favorable y el menos favorable es de 1.00 °C tanto en máximas como en mínimas temperaturas, mientras que durante el día mas caliente del año se observó que se encuentra en el orden de los 7.00 °C en picos máximos y mínimos de las curvas, es decir un desempeño no mayor al 15 % entre BAE y BCA en invierno y un aproximado 18 % para verano.

A pesar de la inclusión de modelos alternos, al evaluar el desempeño térmico a través de un modelo computacional, se concluye que no es posible alcanzar el confort térmico en la estructura, esperando que las temperaturas se encontraran entre los 22 y 25 °C (Uriante, 2017), estos modelos sobrepasan los índices de confort térmico de un 44 a 60 %, lo cual, los hace poco resistentes ante cargas térmicas importantes.

En la zona de Nuevo León debe ser considerado la inclusión de mayor variedad elementos aislantes, dichos elementos aportarían sustancialmente la conservación de la temperatura neutra en el interior de la estructura, propiciando confort térmico para los habitantes y una cantidad importante de ahorro de energía y reducción de contaminantes (CO₂).

TRABAJOS FUTUROS

Se mencionan planteamientos que pueden ser considerados para futuros trabajos, con la finalidad de complementar o mejorar los resultados obtenidos en esta investigación:

Modelar a través del MEF diversas configuraciones geométricas que cumplan con los requisitos de las Normas Técnicas Complementarias para piezas estructurales y/o no estructurales, puesto que basado en la literatura aportan mayor desempeño térmico y retardo en el flujo de calor.

Investigar y modelar la adición de elementos aislantes y la influencia que tienen en la conservación del balance térmico en el interior de la estructura mediante la comparación de modelos computacionales.

Realizar estudios donde sea considerado incrementos del espesor de los elementos de mampostería así como una distinta estructuración del elemento de azotea, esto con el fin de que la cantidad de volumen de concreto sea menor que la configuración tradicional.

Estudiar los estados de esfuerzo, campos de deformación y desplazamientos generados por los gradientes de temperaturas, así como la degradación que sufren elementos de la estructura de mampostería.

Realizar un estudio costo beneficio de las piezas para mostrar que sistema constructivo representa un mayor ahorro de recurso económico.

Realizar el estudio en diversos sitios de la República Mexicana, para comparar gradientes térmicos y la aportación de los mecanismos de transferencia de calor, para crear una base de datos nacional de valores máximos y mínimos para temperaturas superficiales de las construcciones.

ANEXO A

Código (Script) Modelo computacional Abaqus CAE (.py.)

```

# -*- coding: mbcs -*-

# Do not delete the following import lines

from abaqus import *

from abaqusConstants import *

import __main__


def ModeloBase():

    import section

    import regionToolset

    import displayGroupMdbToolset as dgm

    import part

    import material

    import assembly

    import optimization

    import step

    import interaction

    import load

    import mesh

    import job

    import sketch

    import visualization

    import xyPlot

    import displayGroupOdbToolset as dgo

    import connectorBehavior

```

```

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas']
f1, e1 = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[13], sketchUpEdge=e1[2],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.2, 0.2,
    0.075))

s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=0.85, gridSpacing=0.02, transform=t)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s1.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas 10cm']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas 10cm']
f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchUpEdge=e[8],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.2, 0.1,
    0.075))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(

```

```

    name='__profile__', sheetSize=0.94, gridSpacing=0.02, transform=t)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Bloque 3 celdas 10cm']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']
p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Columna 30cm']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Columna 30cm']
f1, e1 = p.faces, p.edges
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[3], sketchUpEdge=e1[3],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.15, 2.99,
    0.15))
s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=6.03, gridSpacing=0.15, transform=t)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Columna 30cm']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s1.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']
p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Dale de cerramiento']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

```

```

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Dale de cerramiento']
f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[3], sketchUpEdge=e[10],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.145, 0.15,
    0.075))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=4.59, gridSpacing=0.11, transform=t)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints

s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Dale de cerramiento']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
s.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Firme de concreto']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Firme de concreto']
f1, e1 = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[3], sketchUpEdge=e1[7],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.325463, 0.15,
    1.289537))

s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=7.39, gridSpacing=0.18, transform=t)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints

```

```

s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Firme de concreto']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)

s1.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas']

f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[7], sketchUpEdge=e[11],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.103657, 0.2,
    0.075))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=0.54, gridSpacing=0.01, transform=t)

g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints

s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)

s.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas
10cm']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas
10cm']

```

```

f1, e1 = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[0], sketchUpEdge=e1[1],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(0.103657, 0.1,
    0.075))

s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=0.67, gridSpacing=0.01, transform=t)

g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints

s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Medio Bloque 3 celdas
10cm']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)

s1.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero ID MOD']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues(nearPlane=5.02506,
    farPlane=8.3333, width=3.22275, height=1.28245, viewOffsetX=-0.107613,
    viewOffsetY=0.316772)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero ID MOD']

f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[148], sketchUpEdge=e[116],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.03, 2.11,
    0.015))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(

```



```

    name='__profile__', sheetSize=6.51, gridSpacing=0.16, transform=t)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero ID MOD']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']
p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero SD']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero SD']
f1, e1 = p.faces, p.edges
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[74], sketchUpEdge=e1[16],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.092822,
    2.701109, 0.03))
s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=7.54, gridSpacing=0.18, transform=t)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Mortero SD']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
s1.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']
p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext X']

```

```

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext X']

f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[3], sketchUpEdge=e[10],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.295, 3.12,
    0.0075))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=8.1, gridSpacing=0.2, transform=t)

g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints

s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext X']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)

s.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext Z']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext Z']

f1, e1 = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[3], sketchUpEdge=e1[11],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.3025, 3.12,
    0.0075))

s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=8.12, gridSpacing=0.2, transform=t)

g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints

```

```

s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Ext Z']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)

s1.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Int']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Int']

f, e = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[3], sketchUpEdge=e[10],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.145, 2.99,
    0.0075))

s = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=7.53, gridSpacing=0.18, transform=t)

g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints

s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['Recub Int']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)

s.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

p1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['losa concreto']

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p1)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['losa concreto']

```

```

f1, e1 = p.faces, p.edges

t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[3], sketchUpEdge=e1[8],
    sketchPlaneSide=SIDE1, sketchOrientation=RIGHT, origin=(1.295, 0.13,
    1.295))

s1 = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].ConstrainedSketch(
    name='__profile__', sheetSize=7.33, gridSpacing=0.18, transform=t)

g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints

s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)

p = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].parts['losa concreto']

p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)

s1.unsetPrimaryObject()

del mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].sketches['__profile__']

session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
    engineeringFeatures=ON)

session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
    referenceRepresentation=OFF)

a = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].rootAssembly

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(interactions=ON,
    constraints=ON, connectors=ON, engineeringFeatures=ON)

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(
    step='Transferencia de Calor')

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(interactions=OFF,
    constraints=OFF, connectors=OFF, engineeringFeatures=OFF)

```

```

session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues(nearPlane=7.38376,
    farPlane=12.7669, width=9.03961, height=3.59721, cameraPosition=(
    -6.61184, 1.39321, 5.26525), cameraUpVector=(0.332106, 0.937406,
    -0.104766))

session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues(nearPlane=7.38455,
    farPlane=12.8058, width=9.04058, height=3.59759, cameraPosition=(
    -1.78947, 3.05778, 8.51058), cameraUpVector=(0.336554, 0.857756,
    -0.388569), cameraTarget=(1.32907, 1.46894, -0.944823))

session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues(nearPlane=7.03944,
    farPlane=13.089, width=8.61808, height=3.42946, cameraPosition=(
    -1.38487, 6.27894, 7.49126), cameraUpVector=(0.32058, 0.665366,
    -0.674178), cameraTarget=(1.32958, 1.47302, -0.946115))

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(
    adaptiveMeshConstraints=ON)

mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].steps['Transferencia de
Calor'].setValues(
    timePeriod=24.0, maxNumInc=1000, initialInc=0.01, minInc=0.00024,
    maxInc=24.0, mxdem=0.1)

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(loads=ON, bcs=ON,
    predefinedFields=ON, connectors=ON, adaptiveMeshConstraints=OFF)

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Initial')

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON,
loads=OFF,
    bcs=OFF, predefinedFields=OFF, connectors=OFF)

```

```

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=ON)

elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=DC3D8, elemLibrary=STANDARD)
elemType2 = mesh.ElemType(elemCode=DC3D6, elemLibrary=STANDARD)
elemType3 = mesh.ElemType(elemCode=DC3D4, elemLibrary=STANDARD)
a = mdb.models['Temperaturas Calor 4 Nodos2'].rootAssembly
c1 = a.instances['Columna 30cm-1'].cells
cells1 = c1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c2 = a.instances['Mortero ID MOD-1'].cells
cells2 = c2.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c3 = a.instances['Bloque 3 celdas-1'].cells
cells3 = c3.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c4 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-2'].cells
cells4 = c4.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c5 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-3'].cells
cells5 = c5.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c6 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-4'].cells
cells6 = c6.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c7 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-5'].cells
cells7 = c7.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c8 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-6'].cells
cells8 = c8.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c9 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-7'].cells
cells9 = c9.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c10 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-8'].cells
cells10 = c10.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c11 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-9'].cells
cells11 = c11.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c12 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-10'].cells
cells12 = c12.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c13 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-11'].cells
cells13 = c13.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c14 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-12'].cells
cells14 = c14.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c15 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-13'].cells
cells15 = c15.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c16 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-14'].cells
cells16 = c16.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c17 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-15'].cells
cells17 = c17.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c18 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-16'].cells
cells18 = c18.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c19 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-1-17'].cells
cells19 = c19.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c20 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-1'].cells
cells20 = c20.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c21 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-2'].cells

```

```

cells21 = c21.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c22 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-3'].cells
cells22 = c22.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c23 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-4'].cells
cells23 = c23.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c24 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-6'].cells
cells24 = c24.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c25 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-7'].cells
cells25 = c25.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c26 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-8'].cells
cells26 = c26.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c27 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-9'].cells
cells27 = c27.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c28 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-10'].cells
cells28 = c28.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c29 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-11'].cells
cells29 = c29.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c30 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-12'].cells
cells30 = c30.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c31 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-13'].cells
cells31 = c31.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c32 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-14'].cells
cells32 = c32.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c33 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-15'].cells

```



```

cells33 = c33.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c34 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-16'].cells
cells34 = c34.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c35 = a.instances['Bloque 3 celdas-1-lin-2-17'].cells
cells35 = c35.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c36 = a.instances['Bloque 3 celdas-2'].cells
cells36 = c36.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c37 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-2'].cells
cells37 = c37.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c38 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-3'].cells
cells38 = c38.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c39 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-4'].cells
cells39 = c39.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c40 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-5'].cells
cells40 = c40.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c41 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-6'].cells
cells41 = c41.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c42 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-7'].cells
cells42 = c42.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c43 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-1-8'].cells
cells43 = c43.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c44 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-1'].cells
cells44 = c44.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c45 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-2'].cells
cells45 = c45.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c46 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-3'].cells
cells46 = c46.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c47 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-4'].cells
cells47 = c47.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c48 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-5'].cells
cells48 = c48.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c49 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-6'].cells
cells49 = c49.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c50 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-7'].cells
cells50 = c50.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c51 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-8'].cells
cells51 = c51.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c52 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-9'].cells
cells52 = c52.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c53 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-2-lin-1-2'].cells
cells53 = c53.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c54 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-2-lin-1-3'].cells
cells54 = c54.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c55 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-2-lin-1-4'].cells
cells55 = c55.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c56 = a.instances['Bloque 3 celdas-2-lin-2-2-lin-1-5'].cells
cells56 = c56.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c57 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1'].cells
cells57 = c57.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c58 = a.instances['Bloque 3 celdas-3'].cells
cells58 = c58.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c59 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-1-2'].cells
cells59 = c59.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c60 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-1-3'].cells
cells60 = c60.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c61 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-1-4'].cells
cells61 = c61.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c62 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-1-5'].cells
cells62 = c62.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c63 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-1-6'].cells
cells63 = c63.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c64 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-2-2'].cells
cells64 = c64.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c65 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-2-3'].cells
cells65 = c65.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c66 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-2-4'].cells
cells66 = c66.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c67 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-2-5'].cells
cells67 = c67.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c68 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-1-lin-2-6'].cells

```

```

cells68 = c68.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c69 = a.instances['Dale de cerramiento-1'].cells
cells69 = c69.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c70 = a.instances['Mortero ID MOD-2'].cells
cells70 = c70.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c71 = a.instances['Mortero SD-1'].cells
cells71 = c71.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c72 = a.instances['Mortero SD-1-lin-1-2'].cells
cells72 = c72.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c73 = a.instances['Bloque 3 celdas-4'].cells
cells73 = c73.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c74 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-1-2'].cells
cells74 = c74.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c75 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-1-3'].cells
cells75 = c75.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c76 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-1-4'].cells
cells76 = c76.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c77 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-1-5'].cells
cells77 = c77.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c78 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-2-1'].cells
cells78 = c78.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c79 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-2-2'].cells
cells79 = c79.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c80 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-2-3'].cells

```

```

cells80 = c80.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c81 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-2-4'].cells
cells81 = c81.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c82 = a.instances['Bloque 3 celdas-4-lin-2-5'].cells
cells82 = c82.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c83 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-2'].cells
cells83 = c83.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c84 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-2-lin-1-2'].cells
cells84 = c84.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c85 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-1'].cells
cells85 = c85.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c86 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-1-lin-1-2'].cells
cells86 = c86.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c87 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-1-lin-1-3'].cells
cells87 = c87.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c88 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-1-lin-1-4'].cells
cells88 = c88.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c89 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-1-lin-1-5'].cells
cells89 = c89.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c90 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas 10cm-1'].cells
cells90 = c90.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c91 = a.instances['Mortero ID MOD-3'].cells
cells91 = c91.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c92 = a.instances['Bloque 3 celdas-5'].cells
cells92 = c92.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c93 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-2'].cells
cells93 = c93.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c94 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-3'].cells
cells94 = c94.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c95 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-4'].cells
cells95 = c95.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c96 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-5'].cells
cells96 = c96.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c97 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-6'].cells
cells97 = c97.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c98 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-7'].cells
cells98 = c98.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c99 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-8'].cells
cells99 = c99.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c100 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-9'].cells
cells100 = c100.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c101 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10'].cells
cells101 = c101.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c102 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-11'].cells
cells102 = c102.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c103 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-2'].cells
cells103 = c103.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c104 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-3'].cells
cells104 = c104.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c105 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-4'].cells
cells105 = c105.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c106 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-5'].cells
cells106 = c106.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c107 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-6'].cells
cells107 = c107.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c108 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-7'].cells
cells108 = c108.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c109 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-8'].cells
cells109 = c109.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c110 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-9'].cells
cells110 = c110.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c111 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-lin-1-10'].cells
cells111 = c111.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c112 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2'].cells
cells112 = c112.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c113 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3'].cells
cells113 = c113.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c114 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4'].cells
cells114 = c114.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c115 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5'].cells

```

```

cells115 = c115.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c116 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-6'].cells
cells116 = c116.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c117 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-7'].cells
cells117 = c117.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c118 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-8'].cells
cells118 = c118.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c119 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-9'].cells
cells119 = c119.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c120 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10--lin-1-10'].cells
cells120 = c120.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c121 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10--lin-1-11'].cells
cells121 = c121.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c122 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-1'].cells
cells122 = c122.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c123 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-1'].cells
cells123 = c123.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c124 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4-1'].cells
cells124 = c124.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c125 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5-1'].cells
cells125 = c125.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c126 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-6-1'].cells
cells126 = c126.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c127 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-7-1'].cells

```



```

cells127 = c127.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c128 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-8-1'].cells
cells128 = c128.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c129 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-9-1'].cells
cells129 = c129.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c130 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10--lin-1-10-1'].cells
cells130 = c130.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c131 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-2'].cells
cells131 = c131.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c132 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-2'].cells
cells132 = c132.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c133 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4-2'].cells
cells133 = c133.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c134 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5-2'].cells
cells134 = c134.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c135 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-6-2'].cells
cells135 = c135.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c136 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-7-2'].cells
cells136 = c136.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c137 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-8-2'].cells
cells137 = c137.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c138 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-9-2'].cells
cells138 = c138.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c139 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10--lin-1-10-2'].cells
cells139 = c139.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c140 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10--lin-1-11-1'].cells
cells140 = c140.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c141 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-3'].cells
cells141 = c141.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c142 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-3'].cells
cells142 = c142.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c143 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4-3'].cells
cells143 = c143.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c144 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5-3'].cells
cells144 = c144.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c145 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-4'].cells
cells145 = c145.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c146 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-4'].cells
cells146 = c146.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c147 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3'].cells
cells147 = c147.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c148 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-2'].cells
cells148 = c148.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c149 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-3'].cells
cells149 = c149.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

c150 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-4'].cells
cells150 = c150.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )

```

```

c151 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-5'].cells
cells151 = c151.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c152 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-6'].cells
cells152 = c152.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c153 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-7'].cells
cells153 = c153.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c154 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-8'].cells
cells154 = c154.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c155 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-9'].cells
cells155 = c155.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c156 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-10'].cells
cells156 = c156.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c157 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-2-1'].cells
cells157 = c157.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c158 = a.instances['Mortero ID MOD-3-lin-1-2'].cells
cells158 = c158.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c159 = a.instances['Mortero SD-2'].cells
cells159 = c159.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c160 = a.instances['Mortero SD-2-lin-2-1'].cells
cells160 = c160.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c161 = a.instances['Dale de cerramiento-2'].cells
cells161 = c161.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c162 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-5'].cells

```

```

cells162 = c162.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c163 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-5'].cells
cells163 = c163.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c164 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4-4'].cells
cells164 = c164.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c165 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5-4'].cells
cells165 = c165.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c166 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-6-3'].cells
cells166 = c166.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c167 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-2-6'].cells
cells167 = c167.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c168 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-3-6'].cells
cells168 = c168.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c169 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-4-5'].cells
cells169 = c169.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c170 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-5-5'].cells
cells170 = c170.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c171 = a.instances['Bloque 3 celdas-5-lin-1-10-l-lin-1-6-4'].cells
cells171 = c171.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c172 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-2-2'].cells
cells172 = c172.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c173 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas-3-lin-1-3-1'].cells
cells173 = c173.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c174 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-2'].cells

```

```

cells174 = c174.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c175 = a.instances['Medio Bloque 3 celdas 10cm-2'].cells
cells175 = c175.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c176 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-2-lin-1-5'].cells
cells176 = c176.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c177 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-2-lin-1-6'].cells
cells177 = c177.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c178 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-2-lin-1-7'].cells
cells178 = c178.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c179 = a.instances['Bloque 3 celdas 10cm-2-lin-1-8'].cells
cells179 = c179.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c180 = a.instances['losa concreto-1'].cells
cells180 = c180.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c181 = a.instances['Recub Ext Z-1'].cells
cells181 = c181.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c182 = a.instances['Recub Ext X-1'].cells
cells182 = c182.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c183 = a.instances['Recub Int-1'].cells
cells183 = c183.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
c184 = a.instances['Recub Int-2'].cells
cells184 = c184.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
pickedRegions = ((cells1+cells2+cells3+cells4+cells5+cells6+cells7+cells8+\
cells9+cells10+cells11+cells12+cells13+cells14+cells15+cells16+cells17+\

```

cells18+cells19+cells20+cells21+cells22+cells23+cells24+cells25+\
cells26+cells27+cells28+cells29+cells30+cells31+cells32+cells33+\
cells34+cells35+cells36+cells37+cells38+cells39+cells40+cells41+\
cells42+cells43+cells44+cells45+cells46+cells47+cells48+cells49+\
cells50+cells51+cells52+cells53+cells54+cells55+cells56+cells57+\
cells58+cells59+cells60+cells61+cells62+cells63+cells64+cells65+\
cells66+cells67+cells68+cells69+cells70+cells71+cells72+cells73+\
cells74+cells75+cells76+cells77+cells78+cells79+cells80+cells81+\
cells82+cells83+cells84+cells85+cells86+cells87+cells88+cells89+\
cells90+cells91+cells92+cells93+cells94+cells95+cells96+cells97+\
cells98+cells99+cells100+cells101+cells102+cells103+cells104+cells105+\
cells106+cells107+cells108+cells109+cells110+cells111+cells112+\
cells113+cells114+cells115+cells116+cells117+cells118+cells119+\
cells120+cells121+cells122+cells123+cells124+cells125+cells126+\
cells127+cells128+cells129+cells130+cells131+cells132+cells133+\
cells134+cells135+cells136+cells137+cells138+cells139+cells140+\
cells141+cells142+cells143+cells144+cells145+cells146+cells147+\
cells148+cells149+cells150+cells151+cells152+cells153+cells154+\
cells155+cells156+cells157+cells158+cells159+cells160+cells161+\
cells162+cells163+cells164+cells165+cells166+cells167+cells168+\
cells169+cells170+cells171+cells172+cells173+cells174+cells175+\
cells176+cells177+cells178+cells179+cells180+cells181+cells182+\
cells183+cells184),)

a.setElementType(regions=pickedRegions, elemTypes=(elemType1,

```
elemType2,  
    elemType3))  
  
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF)  
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(  
    meshTechnique=OFF)
```

```
def ModeloBaseResults():  
    import section  
    import regionToolset  
    import displayGroupMdbToolset as dgm  
    import part  
    import material  
    import assembly  
    import optimization  
    import step  
    import interaction  
    import load  
    import mesh  
    import job  
    import sketch  
    import visualization  
    import xyPlot  
    import displayGroupOdbToolset as dgo
```

```

import connectorBehavior

session.mdbData.summary()

o3 = session.openOdb(
    name='C:/WINDOWS/system32/TemperaturasCalor2Presentacion.odb')

session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=o3)

session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.display.setValues(plotState=(
    CONTOURS_ON_DEF, ))

session.animationController.setValues(animationType=TIME_HISTORY,
viewports=(
    'Viewport: 1', ))

session.animationController.play(duration=UNLIMITED)

session.animationController.stop()

session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.setPrimaryVariable(
    variableLabel='NT11', outputPosition=NODAL, )

session.animationController.showFirstFrame()

session.animationController.play(duration=UNLIMITED)

session.animationController.stop()

```


REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

A., Nadjai, M. O'Gara, F. Ali y R. Jurgen, (2006) "Compartment Masonry Walls in Firme Situations", Fire Technology, vol. 42, pp. 211-231, 2006/07/01 2006.

A., Sakalli, A., Cescatti, A., Dosio y M.U., Gücel. (2017). Impact of 2°C global warming on primary production and soil carbon storage capacity at pan-European level. Climate Services, (7), 64-77.

A.A., Alghamdi, y H.A., Alharthi. (2017). Multiscale 3D finite-element modelling of the thermal conductivity of clay brick walls. Construction and Building Materials, (157), 1-9.

A.C., Borbón, R.E., Cabanillas, y J.B., Pérez. (2010). Modelación y Simulación de la Transferencia de Calor en Muros de Bloque de Concreto Hueco. Información Tecnológica, 21(3), 27-38.

Abdulla, K. F., Cunningham, L. S., & Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. Engineering Structures, 151, 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.021>

Al-Hadhrani, L., y Ahmad, A. (2009) Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. Applied Thermal Engineering. 29, 1123-1130

Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., & Al-Hussain, S. N. (2013). Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls. Applied Energy, 102, 1063–1070. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>

American Concrete Institute (2002) Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems, ACI-122R-02, United States of America

Aramide, B. (2012). Production and characterization of porous insulating fired brick from iron clay with varied sawdust admixture. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, 970-975

Asadi, I., Shafigh, P., Abu Hassan, Z. F. Bin, & Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 20(July), 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>

ASHREA (2013). Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, ASHREA 55-2010, vol. 8400

ASHRAE. (2017). ASHRAE STANDARD 55-2017 Thermal Enviromental Conditions For Human Occupancy.

B., Lacarrière, B., Lartigue y F., Monchoux. (2003). Numerical study of heat transfer in a wall of vertically perforated bricks: influence of assembly method. *Energy and Buildings*, (35), 229-237.

Barbosa Saldaña, J. G., Gutiérrez Torres, C. del C., & Jiménez Bernal, J. A. (2016). *Termodinámica para ingenieros (Patria)*. Distrito Federal, México.

Biseniece, E., Žogla, G., Kamenders, A., Purviņš, R., Kašs, K., Vanaga, R., & Blumberga, A. (2017). Thermal performance of internally insulated historic brick building in cold climate: A long term case study. *Energy and Buildings*, 152, 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.082>

Brown, T.D., y Javaid, M.Y. (1970) The thermal conductivity of fresh concrete. *Matériaux Et Constructions*, 3(18), 411-416.

Bustillos, D. A. (2017). "Calidad del ambiente interior de las edificaciones residenciales urbanas de la Ciudad de Cuenca: Determinación de estándares de confort." Univesidad de Cuenca, 20.

Cao, X., Dai, X., y Liu, J.(2016) Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy & Buildings*, 128, 198-213.

Carman, A.P., y Nelson, R.A. (1921) The thermal conductivity and diffusivity of concrete. *University of Illinois Bulletin*, XVIII(34), 5-10

Castilla, M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., & Pérez, M. (2010). Técnicas de Control del Confort en Edificios. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 7(3), 5–24. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70038-8](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70038-8)

Cavazos, D. (2016) Simulación del comportamiento de Muretes de Mampostería de Concreto ante Carga de Compresión Uniaxial. Universidad Autónoma de Nuevo León.

CEN, "Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design" in Eurocode 4 vol. EN1994-1-2:2005, ed Brussel, Belgium: European Committee for Standardization, 2005.

CEN, "Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design" in Eurocode 2 vol. EN1992-1-2:2004, ed Brussel, Belgium: European Committee for Standardization, 2004,p.97.

CEN, "Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design", Eurocode 2 vol. EN 1992-1-2:2004, ed.Brussels, Belgium: European Committee for standardization, 2004, p.97

CEN, "Design of masonry structures-Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures" en Eurocode 6 vol. EN 1996-1-1:2005, ed Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005, p. 123

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa "Fundamentos y aplicaciones" (Cuarta Edi). Distrito Federal, México: McGraw-Hill.

Chandrupatla, T. R., & Belegundu, A. D. (1999). Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería (Segunda Ed). Pearson Prentice Hall.

Comisión Nacional de Vivienda. CONAVI: Proyecciones de población de México y las entidades federativas 1990-2030 de CONAPO.CONEVI (2018)

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (CONUEE): Norma Oficial Mexicana en Eficiencia Energética-Edificaciones-NOM-008-ENER-2001: Eficiencia energética en edificaciones envolvente de edificios no residenciales. Ciudad de México, México.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (CONUEE): Norma Oficial Mexicana en Eficiencia Energética-Edificaciones-NOM-018-ENER-2011: Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba. Ciudad de México, México.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (CONUEE): Norma Oficial Mexicana en Eficiencia Energética-Edificaciones-NOM-020-ENER-2011: Eficiencia energética en edificaciones, Envolvente de edificios para uso habitacional. Ciudad de México, México.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (CONUEE): Norma Oficial Mexicana en Eficiencia Energética-Edificaciones-NOM-024-ENER-2012: Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para

edificaciones. Etiquetado y métodos de prueba. Ciudad de México, México.

Conde, C. (2011). México y el Cambio Climático Global. Retrieved from http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico_y_el_cambio_climatico.pdf

CONEVYT. (2009). Regiones de México. Retrieved from Ciencias Naturales website:

https://www.conevyt.org.mx/colaboracion/colabora/objetivos/libros_pdf/sso1_u3lec_c2.pdf

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. CONEVAL: Medición de la pobreza, Pobreza en México, Resultados de pobreza en México 2016 a nivel nacional y por entidades federativas. CONEVAL (2016)

Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, G. e I. (1982). Estudios de la climatología de México. México, D.F.

Covarrubias, M. (2018). Comportamiento Estructural Analítico de Muros de Mampostería Sometidos a Altas Temperaturas. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Custodio-García, E., Sebastian, P. J., Campos-Alvarez, J., Treviño Palacios, C.G., Zarate, E.A., Cordova, Q.A., y De la O-León, H. (2005) Solar conduction heat transfer in fired clay bricks. Solar Energy Materials & Solar Cells, 88(2), 169-178

D., Griego, M., Krarti y A., Hernandez-Guerrero. (2015). Energy efficiency optimization of new and existing office buildings in Guanajuato, México. Sustainable Cities and Society, (17), 132-140.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Abaqus Glossary. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Abaqus/CAE User's Guide. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Getting Started with Abaqus: Interactive Edition. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.13 (2015). Getting Started with Abaqus: Keywords Edition. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Dassault Systemes, Abaqus 6.6 (2006). ABAQUS Theory Manual. Dassault Systemes. Providence, Rhode Island, Estados Unidos de América.

Del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Rodríguez, A.M., Lozano Martínez-Luengas, A., y Betegón Biempica, C. (2005) Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by finite element method and experimental validation. Applied Thermal Engineering, 26, 777-786

Edwards, C. H., & Penney, D. E. (2001). Ecuaciones diferenciales (Segunda Ed). Pearson Educación.

EN (2007). DS/EN 15251:2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality,

thermal environment, lighting and acoustics. pp 54 DOI 10.1520/E2019-03R13

Fanger, P.O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine* 30, 313–324

G. Kanellopoulos, V.G., Koutsomarkos, K.J., Kontoleon, y K., Georgiadis-Filikas. (2017). Numerical Analysis and Modelling of Heat Transfer Processes through Perforated Clay Brick Masonry Walls. *Procedia Environmental Sciences*, (38), 492-499.

Gaceta Oficial de la Ciudad de México (GOCM) (2017). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería". Ciudad de México, México

H., Asan, y Y.S., Sancaktar. (1998). Effects of the Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, (28), 159-166.

H., Gallegos y C., Casabonne, (2005) *Albañilería Estructural*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica de Perú. Perú.

Herrera, L. (2015). Comfort temperatures and thermal comfort range in low cost dwellings in arid climate. *Hábitat Sustentable*, 3(1), 26–36.

Howells, B. (2015). Measuring temperatures. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 16(7), 358–362.

Huelsz G.(2013), Informe técnico 3 del proyecto: Desarrollo y validación de una metodología para estimar los impactos en el ahorro de energía por el uso de sistemas pasivo-constructivos en la edificación para diferentes climas de México. Apoyado por el Fondo Sectorial conacyt-sener Sustentabilidad energética, número de Registro: FSE-2009-01-118665

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). Introduction to heat transfer (Third Edit). John Wiley and Sons. Inc.

INEGI. (2017). Territorio Nuevo León. Retrieved from Clima website: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/clima.aspx?tema=me&e=19>

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. In Cambio climático 2007: Informe de síntesis. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

ISO (2002). UNE-EN ISO 10551: 1995. 2002. S.1.: s.n.

ISO (2006). UNE-EN ISO 7730. 2006. S.1.: s.n.

ISO, "Elements of building construction-Part 1: General requirements", in Fire Resistance tests vol. ISO 834-1:1999, ed. Geneve, Switzerland: international Organization for Standardization, 1999. 25

J., Xamán, J., Cisneros-Carreño, I., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, K.M., Aguilar-Castro, y E.V., Macias-Melo. (2017). Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in México. Applied Thermal Engineering, (123), 243-255.

J.B., Pérez, R.E., Cabanillas, J.F., Hinojosa, y A.C. Borbón. (2011). Estudio Numérico de la Resistencia Térmica en Muros de Bloques de Concreto Hueco con Aislamiento Térmico. Información Tecnológica, 22 (3), 27-38.

J.G., Rios-Alejandro. (2011). Extreme temperatures in the city of Monterrey N.L. México, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 17 (2), 225-230.

J.J., del Coz Díaz, P.J., García Nieto, A.M., Rodríguez, A.L., Martínez-Luengas, y C.B., Biempica. (2006). Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, (26), 777-786.

J.J., del Coz Díaz, P.J., García Nieto, C.B., Biempica, y M.B. Prendes Gero. (2007). Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick wall design by the finite element method. *Applied Thermal Engineering*, (27), 1445-1456.

K.-Y. Shin, S.-B. Kim, J.-H Kim, M. Chung y P.-S. Jung, (2002) "Thermal-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures" *Nuclear Engineering and Design*, vol. 212, pp. 233-241, 3.

K.J., Kontoleon, T.G., Theodosiou, y K.G., Tsikaloudaki. (2013). The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements. *Applied Energy*, (112), 325-337.

Khan, F., Bolhassani, M., Koutsos, A., Hamid, A., & Bartoli, I. (2015). Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures. *Infrared Physics and Technology*, 69, 228–237.
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.02.001>

Kim, K., Jeon, S., Kim, J., & Yang, S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. 33, 363–371.

L., Zhang, T., Luo, X., Meng, Y., Wang, C., Hou, y E. Long. (2017). Effect of the thermal insulation layer location on wall dynamic thermal response rate under the air-conditioning intermittent operation. *Case Studies in Thermal Engineering*, (10), 79-85.

L.M., Al-Hadrrami, y A. Ahmad. (2009). Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. *Applied Thermal Engineering*, (29), 1123-1130.

Liang, J. y R. Du (2005). Thermal comfort control based on neural network for hvac application. In: *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, Canada

Lira-Cortés, L., & González Rodríguez, O.J. Méndez-Lango, E. (2008). Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones. *Simposio de Metrología 2008*, (1), 2–6

M., Pablo-Romero, R., Pozo-Barajas y R., Yñiguez. (2017). Global Changes in residential energy consumption, *Energy Policy*, (101), 342-352.

M.A., Antar, y H. Baig. (2009). Conjugate conduction-natural convection heat transfer in hollow building block. *Applied Thermal Engineering*, (29), 3716-3720.

M.M., Al-Hazmy. (2006). Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. *Energy and Buildings*, (38), 515-521.

Mahmou, A. M., Ben-Nakhi, A., Ben-Nakhi, A., & Alajmi, R. (2012). Conjugated conduction convection and radiation heat transfer through hollow autoclaved aerated concrete blocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(4), 248–262.

Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2016). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.005>

Molar-Orozco, M. E., & Huelsz-Lesbros, G. (2017). Comparación del comportamiento térmico de muros de concreto armado y de bloques de concreto huecos. *Legado de Arquitectura Y Diseño*, 1(22). Retrieved from <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4779/477951390002/html/index.html>

Nguyen, T. D., Meftah, F., Chammas, R., & Mebarki, A. (2009). The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Safety Journal*, 44(4), 629–641. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.12.006>

Norma Europea. (UNE): UNE-EN ISO 6946:2012: Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. (2015), 35

ONNCCE, “Resistencia al fuego de elementos y componentes especificaciones y métodos de ensayo”, -Industria de la construcción-Edificaciones vol. NMX-C-307/1-ONNCCE-2009, ed, México: Diario Oficial de la Federación, 2009

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C. Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013: Industria de la Construcción-Mampostería-Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso No Estructural- Especificaciones y Métodos de Ensayo.ONNCCE. Ciudad de México, México

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C. Norma Mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2019: Industria de la Construcción-Aislamiento Térmico-Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la república mexicana, especificación y verificación.ONNCCE. Ciudad de México, México

Ossama A. Abdou, Kris S. Murali b., (1994). The Effect of Air Cells and Mortar Joints on the Thermal Resistance of Concrete masonry Walls, *Energy and Buildings*: 21, 111-119

Qian, L., Pang, X., Zhou, J., Yang, J., Lin, S., y Hui. D.(2016) Theoretical model and finite element simulation on the effective thermal conductivity of particulate composite materials. *Composites Part B*. 116(XX), 291-297.

R. Ayuntamiento de Monterrey. Reglamento para las construcciones del Municipio de Monterrey (RCCM), Nuevo León. Gobierno Municipal de Monterrey. Monterrey, México (2015).

R. Bassiouny, M.R.O., Ali, y E.H., NourEldeen.(2016). Modeling the Thermal Behavior of Egyptian Perforated Masonry Red Brick Filled with Material of low Thermal Conductivity. *Journal of Building Engineering*, (5), 158-164.

R., Illampas, A., Kyriakidis, y A. Michael. (2017). Computational Evaluation of the Thermal, Environmental and Structural Performance of an Innovative Masonry System. *Procedia Environmental Sciences*, (38), 812-820.

Raefat, S., Garoum, M., Souihel, M., & Laaroussi, N. (2017). Thermal transmittance comparison between multilayer walls made from hollow fired clay and plaster-granular cork bricks using electrical analogy. *Energy Procedia*, 139, 596–601. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.259>

Rao, S. (2011) *The Finite Element Method in Engineering*. Butterworth-Heinemann. Elseviwe. Burlington, Massachusetts, Estados Unidos de América.

Remesar, J. C., Vera, S., & Lopez, M. (2017). Assessing and understanding the interaction between mechanical and thermal properties in concrete for developing a structural and insulating material. *Construction and Building Materials*, 132, 353–

364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.116>

RITE, (2017) Reglamentos de instalaciones térmicas en los edificios, RITE-2007. 2007. España: s.n.

Robati, M., McCarthy, T. J., & Kokogiannakis, G. (2016). Incorporating environmental evaluation and thermal properties of concrete mix designs. *Construction and Building Materials*, 128, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.092>

Ruvalcaba, F. (2010). Mechanical Properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. The University of Manchester.

S., Lorente, M., Petit y R., Javelas. (1996). Simplified analytical model for thermal transfer in vertical hollow brick. *Energy and Buildings*, (24), 95-103.

S., Lorente, M., Petit, y R., Javelas. (1998). The effects of temperature conditions on the thermal resistance of walls made with shapes vertical hollow bricks. *Energy and Buildings*, (28), 237-240.

S.N. Shoukry, G.W. William, B. Downie, y M.Y. Riad, (2011) “Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 688-696, 2.

Salazar, A. (1999). El método del elemento finito aplicado en la solución de problemas de transferencia de calor en una dimensión. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Sassine, E., Younsi, Z., Cherif, Y., Chauchois, A., & Antczak, E. (2017). Experimental determination of thermal properties of brick wall for existing construction in the north of France. *Journal of Building Engineering*, 14(August

2016), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.007>

Seegerlind, & J., L. (1984). Applied finite element analysis (First Edit). John Wiley and Sons. Inc.

Spark, W. (2019). El clima promedio en Monterrey, México. Retrieved September 4, 1BC, from <https://es.weatherspark.com/y/5154/Clima-promedio-en-Monterrey-México-durante-todo-el-año>

T. Z. Harmathy, (1970) “Thermal properties of concrete at elevated temperatures”, Journal of Materials in Civil Engineering.

Tae, S.Y., Yeon, J.J., Tong-Seok, H., y Kwang-Soo Y. (2013) Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes. Energy and Buildings, 61, 125-132

U.S.NRC. “A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures” vol. NUREG/CR-7031, ed. TN, USA: United States Nuclear Regulatory Commission, 2010, p. 276

Uriarte, J. (2017). Análisis Numérico del Comportamiento Térmico de Bloques de Construcción. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Vidal Zepeda, R. (2005). Las regiones climáticas de México (Primera). México, D.F.: Instituto de Geografía-UNAM.

Wu, J., Liu, C., Li, H., Ouyang, D., Cheng, J., Wang, Y., & You, S. (2017). Residential air-conditioner usage in China and efficiency standardization. Energy, 119, 1036–1046. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.038>

Xamán, J., Cisneros-Carreño, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., Aguilar-Castro, K. M., & Macias-Melo, E. V. (2017). Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico. *Applied Thermal Engineering*, 123, 243–255.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.163>

Zhang, L., Tao, L., Meng, X., Wang, Y., Hou, C., y Long, E. (2017) Effect of the thermal insulation layer location on wall dynamic thermal response rate under the air-conditioning intermittent operation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10(288), 79-85

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method Volume 1* (Fifth Edit). Butterworth-Heinemann.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method Volume 3* (Fifth Edit). Butterworth-Heinemann.